

**PROPUESTA DE UN DISEÑO DE UN SISTEMA INDIVIDUAL DE TRATAMIENTO DE  
AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA PARA UNA UNIDAD HABITACIONAL DE LA ZONA  
RURAL EN COLOMBIA**

**SANTIAGO ACHURI VARGAS**

**SANDRA MILENA BUSTOS CASTRO**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**BOGOTÁ D.C.**

**2021**

**PROPUESTA DE UN DISEÑO DE UN SISTEMA INDIVIDUAL DE TRATAMIENTO DE  
AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA PARA UNA UNIDAD HABITACIONAL DE LA ZONA  
RURAL EN COLOMBIA**

**SANTIAGO ACHURI VARGAS**

**SANDRA MILENA BUSTOS CASTRO**

**Proyecto de grado para optar por el título de:**

**Ingeniero Químico**

**Director:**

**HARVEY ANDRÉS MILQUEZ SANABRIA**

**INGENIERO QUÍMICO**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**BOGOTÁ D.C.**

**2021**

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

---

---

Felipe Correa  
Jurado 1

---

Luis Figueroa  
Jurado 2

Bogotá D. C., enero de 2021

## **DIRECTIVAS DE LAS UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

**Dr. MARIO POSADA GARCÍA – PEÑA**

Consejero Estudiantil

**Dr. LUIS JAIME POSADA GARCIA-PEÑA**

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

**Dra. MARÍA CLAUDIA APONTE GONZÁLEZ**

Vicerrector Administrativo y Financiero

**Dr. RICARDO ALFONSO PEÑARANDA CASTRO**

Secretaria General

**Dra. ALEXANDRA MEJÍA GUZMÁN**

Decano de la Facultad de Ingenierías

**Ing. JULIO CÉSAR FUENTES ARISMENDI**

Director del Programa de Ingeniería Química

**Ing. IVÁN RAMÍREZ MARÍN**

## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis a mis papas quienes fueron los que me apoyaron económica y psicológicamente, además de todo el tiempo que invirtieron para que yo tuviera todas las comodidades en el desarrollo de mi carrera y la tesis.

A mi hermana quien me agunto en los momentos difíciles y me brindo su apoyo todo el tiempo cuando me veía que trataba de rendirme.

A mi compañera de tesis Sandra Bustos por siempre estar apoyándome y brindándome su apoyo mientras elaborábamos la tesis, además de comprometerse todo el tiempo posible con el trabajo de grado que desarrollamos.

A los profesores de la Fundación Universidad de América que siempre estuvieron pendientes en mi proceso académico brindándome ayuda en momentos difíciles en los cuales no entendía muy bien el contenido temático.

Y por último todos lo que me apoyaron y me brindaron su ayuda para escribir y concluir esta tesis .

**Santiago Achuri Vargas**

Dedico este proyecto de grado:

A Dios, por darme la oportunidad de estar rodeada de todos mis seres queridos y ser parte de su vida y por brindarme la fortaleza necesaria para culminar esta etapa tan importante en mi vida.

A mi mamá hermosa y a mi papá, por apoyarme siempre de manera incondicional, por brindarme su sabiduría y consejos, por escucharme siempre, por darme la oportunidad de crecer como persona y profesional y sobre todo, por brindarme su amor y cariño.

A mi hermana, por siempre estar ahí para mí en todas las etapas de mi vida, incluyendo las buenas y las malas, por guiarme con sus consejos, por ser un ejemplo a seguir, por ser tan especial conmigo y por brindarme todo su amor y cariño.

A mi madrina, por bríndame su sabiduría, consejos y cariño, por ser un ejemplo a seguir, por ser un apoyo incondicional para mi familia y por siempre estar pendiente de todos nosotros.

A mi mejor amiga, por brindarme su apoyo y consejos, por estar ahí para mí en los buenos y malos momentos, por escucharme siempre, por dejarme participar en sus proyectos de vida y compartir conmigo sueños y metas en conjunto.

A mi compañero de tesis, por brindarme el voto de confianza y trabajar juntos en este proyecto con dedicación y compromiso, la cual es etapa fundamental para formarnos como profesionales.

A mis amigos, por compartir y estar presentes en diferentes etapas de mi vida que me han permitido crecer como persona.

**Sandra Milena Bustos Castro**

## **AGRADECIMIENTOS**

Le agradezco a Dios por ayudarme a lo largo de mi carrera en momentos en los cuales trate de desfallecer , de guiarme en todo momento e iluminarme durante el transcurso de toda la carrera. También a mis papás ,Jorge Achuri y Marcela Vargas, que me apoyaron psicológicamente en momentos difíciles en los cuales me trate de rendir, además del apoyo económico que me brindaron por 5 años el cual fue importante para solo enfocarme en mis estudios. A mi hermana que me apoyo, me soporto durante todo el tiempo transcurrido de mi carrera y el tiempo que vivimos juntos . A mis amigos los cuales me apoyaba y me incentivaron en el proceso de aprendizaje y a ayudarme para cuestionarme de lo que pensé que ya sabía .

A todos los profesores de la fundación universidad de América que dedicaron horas en enseñarme todos sus conocimientos, además de soportar muchas discusiones y enseñarme el camino correcto de las cosas. A las directivas que me dieron las herramientas para facilitar el proceso de aprendizaje y mantener una institución en las mejores condiciones estructurales éticas. A todos los funcionarios que se encargaban de mantener la universidad totalmente limpia para mantener la salud e integridad de los estudiantes .

A mí director de tesis Harvey Milquez el cual nos ayudó a mantener la línea de investigación por el camino correcto además de darnos ánimo a mi compañera Sandra Bustos y a mí para poder profundizar nuestra investigación

Y por último a mi compañera de tesis Sandra Bustos por soportar días malos durante la realización de la tesis además de mantener la calma en momentos difíciles y ayudarme a superar muchas metas durante este proceso .

**Santiago Achuri Vargas**

Expreso mis más sinceros agradecimientos a:

A Dios, por ser esa fortaleza en mi vida y guiarme a superar cada obstáculo presente en mi vida, por dejarme ser parte de mi familia y permitirme culminar esta etapa tan importante para mi como para mi compañero de tesis.

A mi familia hermosa, por ayudarme a culminar mi carrera profesional y formarme como persona a partir de consejos llenos de sabiduría, por ser esa fuerza que me permite seguir adelante y enfrentar cualquier obstáculo y desafío, pero sobre todo, les agradezco por brindarme su amor incondicional.

A mi compañero de tesis, por su dedicación y compromiso para culminar este proyecto de grado y diferentes etapas en mi carrera, por brindarme su consejos, conocimientos y calma en los momentos precisos, además de permitir disfrutar el desarrollo de este proyecto de tesis.

A la Fundación Universidad América y a sus docentes, por brindarme el espacio y el conocimiento necesario para desarrollarme como futura profesional íntegra en cada uno de los semestres cursados.

A nuestro director de tesis, Harvey Andrés Milquez Sanabria, por brindarnos su tiempo, asesoramiento y confianza para el desarrollo de este trabajo de grado y por tenernos presentes en diferentes proyectos que nos permiten crecer como profesionales.

A todas las personas que participaron en esta etapa de mi vida, acompañándome, guiándome y ofreciéndome su apoyo incondicional.

**Sandra Milena Bustos Castro**

Las directivas de la Fundación Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los créditos e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	20
<b>OBJETIVOS</b>	22
<b>1. MARCO TEÓRICO</b>	23
1.1. <b>Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR)</b>	23
1.2. <b>Tipos de Tratamiento de Aguas Residuales</b>	25
1.2.1. <i>Pretratamientos</i>	25
1.2.2. <i>Tratamientos Primarios</i>	26
1.2.3. <i>Tratamientos Secundario</i>	27
1.2.4. <i>Tratamientos Terciarios</i>	27
<b>2. DIAGNÓSTICO DEL AGUA RESIDUAL DOMESTICA EN COMUNIDADES RURALES DE COLOMBIA</b>	30
2.1. <b>Calidad del Agua en Colombia en la zona rural</b>	30
2.2. <b>Cobertura de Acueducto y Alcantarillado</b>	37
2.2.1. <i>Cobertura del Acueducto</i>	38
2.2.2. <i>Cobertura del Alcantarillado</i>	38
2.2.3. <b>Cobertura de Sistemas de tratamiento de agua residual (STAR)</b>	42
2.3. <b>Agua Residual Doméstica</b>	46
2.3.1. <i>Composición del Agua Residual Doméstica</i>	49
2.4. <b>Normatividad Colombiana de los vertimientos del Agua residual Domestica</b>	57
<b>3. ANTECEDENTES (ESTADO DEL ARTE)</b>	60
3.1. <b>Propósito de la implementación del sistema de tratamiento individual de agua</b>	60
3.2. <b>Sistemas de tratamiento de agua residual domésticos propuestos</b>	62

3.2.1.	<i>Antecedente 1</i>	62
3.2.2.	<i>Antecedente 2</i>	68
3.2.3.	<i>Antecedente 3</i>	72
3.2.4.	<i>Antecedente 4</i>	77
3.3.	Comparación de los modelos propuestos por otros autores	79
4.	<b>DISEÑO DE UN SISTEMA INDIVIDUAL DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA</b>	83
4.1.	Variables para el diseño de un sistema de tratamiento de agua	83
4.2.	Selección del sistema de tratamiento	85
4.2.1.	<i>ETAPA I: Caracterización – Definición</i>	86
4.2.2.	<i>ETAPA II: Diseño Conceptual</i>	88
4.2.3.	<i>ETAPA III: Diseño Detallado</i>	98
5.	<b>EVALUACIÓN TÉCNICA E HIDRODINÁMICA DEL SISTEMA INDIVIDUAL DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA (SITARD).</b>	124
5.1.	Evaluación Técnica del diseño del SITARD para una unidad habitacional en la zona rural	124
5.1.1.	<i>Eficiencia en la remoción de contaminantes en el Sedimentador Primario</i>	126
5.1.2.	<i>Eficiencia en la remoción de contaminantes en el Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA)</i>	127
5.1.3.	<i>Eficiencia en la remoción de contaminantes en el Filtro de carbón Activado Granular</i>	129
5.1.4.	<i>Eficiencia global esperada del SITARD en la remoción de contaminantes.</i>	130
5.2.	Evaluación Hidrodinámica del diseño del SITARD para una unidad habitacional en la zona rural	131
5.2.1.	<i>Evaluación hidrodinámica del Sedimentador Primario del SITARD</i>	137
5.2.2.	<i>Evaluación hidrodinámica del Filtro Anaerobio de Flujo</i>	

<i>Ascendente (FAFA) del SITARD</i>	141
<i>5.2.3.... Evaluación hidrodinámica del Filtro de carbón Activado del SITARD</i>	145
<b>CONCLUSIONES</b>	149
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	151
<b>ANEXOS</b>	161

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Esquema conceptual del Sistema de Tratamiento de Agua Residual.	23
<b>Figura 2.</b> Integración de trenes de tratamiento de aguas residuales	29
<b>Figura 3.</b> Distribución de los valores del índice de riesgo de la calidad del agua, 2008-2012.	32
<b>Figura 4.</b> <i>Distribución de la clasificación del índice del riesgo de la calidad del agua (IRCA) por municipios y por zona rural o urbana, Colombia, 2008-2012, mapa de riesgo.</i>	33
<b>Figura 5.</b> Comportamiento del IRCA nacional, Colombia 2007 – 2017.	34
<b>Figura 6.</b> Niveles de riesgo departamental por zona rural, Colombia 2017.	35
<b>Figura 7.</b> Cobertura del servicio de acueducto 2018 en la zona rural.	40
<b>Figura 8.</b> Cobertura del servicio público de alcantarillado 2018 en el área rural.	41
<b>Figura 9.</b> Avance en el tratamiento de aguas residuales urbanas 2004 – 2017.	42
<b>Figura 10.</b> Número de STAR por regiones en Colombia.	43
<b>Figura 11.</b> Número de STAR por departamentos en Colombia en el año 2017.	43
<b>Figura 12.</b> Cantidad de STAR por departamento en el año 2018.	45
<b>Figura 13.</b> Principales fuentes de aguas residuales.	48
<b>Figura 14.</b> Plano del tanque sedimentador y clarificador del sistema de tratamiento de agua residual para la comunidad indígena de Macapaima	65
<b>Figura 15.</b> Plano del filtro percolador	66
<b>Figura 16.</b> Vista 3D del sistema de tratamiento de agua residual domestica para la comunidad indígena Macapaima	67
<b>Figura 17.</b> Sistema de tratamiento en el sitio de origen evaluado en la propuesta metodológica	69
<b>Figura 18.</b> Representación del método de evaluación técnica	70
<b>Figura 19.</b> Plano con vista de corte con el dimensionamiento de la trampa de grasa, el humedal y el filtro para la finca "El Porvenir 2"	75
<b>Figura 20.</b> Ubicación del modelo del sistema de tratamiento en la finca "El Porvenir 2"	76
<b>Figura 21.</b> Plano del Humedal Artificial	78
<b>Figura 22.</b> Esquema de ubicación del humedal	78

<b>Figura 23.</b> Etapas para el desarrollo de un tratamiento de agua residual.	85
<b>Figura 24.</b> Diagrama de un tren de tratamientos	88
<b>Figura 25.</b> Diagrama de entradas y salidas del sistema individual de tratamiento de agua residual doméstica	89
<b>Figura 26.</b> Diagrama de bloques del Sistema Individual de Tratamiento de Agua Residual Doméstica Seleccionado	99
<b>Figura 27.</b> Plano del Sedimentador Primario del SITARD	104
<b>Figura 28.</b> Esquema del proceso de la digestión anaerobia	107
<b>Figura 29.</b> Plano del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente del SITARD	113
<b>Figura 30.</b> Plano del filtro de carbón activado granular del SITARD	119
<b>Figura 31.</b> Plano del SITARD	121
<b>Figura 32.</b> Plano del SITARD con vista en 3D.	123
<b>Figura 33.</b> Distribución del ARD en el Sedimentador Primario (llenado)	135
<b>Figura 34.</b> Distribución del ARD en el Filtro Anaerobio (llenado)	136
<b>Figura 35.</b> Distribución del ARD en el Filtro de Carbón Activado (llenado)	136
<b>Figura 36.</b> Malla el Sedimentador Primario del SITARD	138
<b>Figura 37.</b> Vectores de entrada y Salida del flujo del ARD en el Sedimentador Primario	139
<b>Figura 38.</b> Variación de la velocidad del ARD en el interior del Sedimentador Primario	139
<b>Figura 39.</b> Grafica de la variación de la velocidad dentro del Sedimentador Primario	140
<b>Figura 40.</b> Malla el Filtro Anaerobio del SITARD	141
<b>Figura 41.</b> Vectores de entrada y Salida del flujo del ARD en el Filtro Anaerobio	142
<b>Figura 42.</b> Variación de la velocidad del ARD en el interior del Filtro Anaerobio	143
<b>Figura 43.</b> <i>Grafica de la variación de la velocidad dentro del Filtro Anaerobio</i>	143
<b>Figura 44.</b> Malla el Filtro de Carbón Activado del SITARD	145
<b>Figura 45.</b> Vectores de entrada y Salida del flujo del ARD en el Filtro de Carbón Activado	146
<b>Figura 46.</b> Variación de la velocidad del ARD en el interior del Filtro de Carbón Activado	147
<b>Figura 47.</b> <i>Grafica de la variación de la velocidad dentro del Filtro de Carbón Activado</i>	147

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Clasificación de las operaciones y procesos en un tratamiento de agua residual.	24
<b>Tabla 2.</b> Clasificación del IRCA	32
<b>Tabla 3.</b> Resultados IRCA por departamento en la zona rural. Colombia, 2017.	36
<b>Tabla 4.</b> Metas Nacionales en Alcantarillado y Tratamiento de aguas residuales.	36
<b>Tabla 5.</b> Cantidad de STAR por departamento en el año 2018.	44
<b>Tabla 6.</b> Consumo de agua en una vivienda.	47
<b>Tabla 7.</b> Componentes Físicos, Químicos y Microbiológicos del agua residual doméstica.	49
<b>Tabla 8.</b> Composición del Agua Residual Doméstica no tratada 1	54
<b>Tabla 9.</b> Composición del Agua Residual Doméstica no tratada 2	54
<b>Tabla 10.</b> Contaminantes del Agua Residual Doméstica, fuente y efectos.	56
<b>Tabla 11.</b> Caudal promedio de las Aguas Residuales Domésticas en el área rural.	57
<b>Tabla 12.</b> Parámetros Normativos para el agua residual doméstica (ARD).	57
<b>Tabla 13.</b> Comparación de la caracterización del ARD con la normatividad	58
<b>Tabla 14.</b> Objetivo de los tipos de Tratamiento de Agua Residual	61
<b>Tabla 15.</b> Carga contaminante del agua residual de las viviendas de la comunidad indígena de Macapaima	63
<b>Tabla 16.</b> Dimensionamiento del tanque para el sistema de tratamiento de agua para la vivienda de la comunidad indígena de Macapaima	63
<b>Tabla 17.</b> Dimensionamiento del filtro percolador para el sistema de tratamiento de agua para la vivienda de la comunidad indígena de Macapaima	64
<b>Tabla 18.</b> Dimensionamiento del sistema de tratamiento de la propuesta 2	69
<b>Tabla 19.</b> Evaluación de la remoción de SST y DQO	71
<b>Tabla 20.</b> Composición del agua residual (agua gris) generado en la finca "El Porvenir 2"	73
<b>Tabla 21.</b> Dimensionamiento de las unidades de operación para el sistema de tratamiento propuesto para la finca "El Porvenir 2"	74
<b>Tabla 22.</b> Tabla Comparativa	79

<b>Tabla 23.</b> Comparación de los modelos propuestos de diseño para el tratamiento de agua residual doméstica.	80
<b>Tabla 24.</b> Variable Dependiente de Diseño	84
<b>Tabla 25.</b> Variables Independientes del Diseño	84
<b>Tabla 26.</b> Caracterización del agua residual doméstica en la zona rural	86
<b>Tabla 27.</b> Caracterización del agua residual doméstica en una unidad habitacional	87
<b>Tabla 28.</b> Calificación para de selección de las unidades de tratamiento del SITARD	91
<b>Tabla 29.</b> Criterios de selección de las unidades de tratamiento del SITARD	92
<b>Tabla 30.</b> <i>Procesos aplicables en el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas</i>	92
<b>Tabla 31.</b> <i>Eficiencia típica de remoción</i>	93
<b>Tabla 32.</b> Tratamiento secundario biológico (anaerobio)	94
<b>Tabla 33.</b> Ventajas y desventajas de tecnologías de tratamientos anaerobios	95
<b>Tabla 34.</b> Ventajas y desventajas de tecnologías de filtración	96
<b>Tabla 35.</b> Matriz de selección	97
<b>Tabla 36.</b> <i>Ecuaciones de diseño del Sedimentador Primario</i>	101
<b>Tabla 37.</b> Estándares de diseño de sedimentadores primarios	102
<b>Tabla 38.</b> Dimensionamiento del sedimentador primario	103
<b>Tabla 39.</b> Ecuaciones de diseño del Filtro Anaerobio	110
<b>Tabla 40.</b> Tiempos de retención hidráulica para filtros anaerobios	111
<b>Tabla 41.</b> Dimensionamiento del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA)	112
<b>Tabla 42.</b> Ecuaciones de diseño del Filtro de Carbón Activado Granular	116
<b>Tabla 43.</b> Configuración del medio filtrante	117
<b>Tabla 44.</b> Dimensionamiento del Filtro de Carbón Activado Granular	118
<b>Tabla 45.</b> Dimensionamiento del SITARD	120
<b>Tabla 46.</b> Eficiencia típica de remoción de las unidades de tratamiento del SITARD	124
<b>Tabla 47.</b> Caracterización del Agua Residual Domestica en el Sedimentador Primario	126
<b>Tabla 48.</b> Caracterización del Agua Residual Domestica en el Filtro Anaerobio	127
<b>Tabla 49.</b> Caracterización del Agua Residual Domestica en el Filtro de carbón Activado	129
<b>Tabla 50.</b> Caracterización del efluente del Sistema Individual de Tratamiento de Agua Residual	130
<b>Tabla 51.</b> Variables para la evaluación hidrodinámica	133



## LISTA DE ABREVIATURÍAS

<b>%</b>	Porcentaje
<b>AR</b>	Agua Residual
<b>ARD</b>	Agua Residual Doméstica
<b>DBO</b>	Demanda Bioquímica de Oxígeno
<b>DQO</b>	Demanda Química de Oxígeno
<b>SITAR</b>	Sistema Individual de Tratamiento de Agua Residual
<b>SST</b>	Solidos Suspendidos Totales

## RESUMEN

Para realizar la propuesta de un diseño de un Sistema Individual de Tratamiento de Agua Residual Doméstica (SITARD) para una unidad habitacional en la zona rural de Colombia, se efectuó un diagnóstico de la calidad del agua, cobertura de alcantarillado y acueducto en la zona rural y la cantidad de sistemas de tratamientos implementados en el país a nivel departamental, determinando el nivel de control y tratamiento que recibe el agua residual doméstica generada.

Después de obtener la recopilación de información de la zona rural en Colombia, se implementó tres etapas para el desarrollo del diseño. En la etapa I, se realizó la caracterización de los parámetros de DBO, DQO, SST, Aceites y Grasas del vertimiento del agua residual doméstica de una unidad habitacional compuesta por 4 personas, para su comparación con la Resolución 0631 del 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, lo que permitió evidenciar que sobrepasa los valores establecidos, generando un vertimiento que requiere de un tratamiento. Para etapa II, se evaluó las unidades de tratamiento, seleccionando la sedimentación primaria, seguida de una filtración anaerobia y por último, una filtración de carbón activado granular. En la etapa III, se dimensiono las tres unidades de tratamiento para la unidad compacta.

Finalmente, se realiza dos tipos de evaluación a partir del diseño obtenido, la primera es una evaluación técnica, en la cual, por medio de los rendimientos estándar de las unidades de tratamiento establecidos en la bibliografía, se determina un rendimiento global y la composición final esperada del vertimiento al pasar por la unidad de tratamiento para su comparación con la Resolución 0631 del 2015, evidenciando el cumplimiento de la normatividad y la segunda, una evaluación hidrodinámica, en la que se determina el comportamiento del agua residual en términos de velocidad al pasar por cada una de las unidades de tratamiento que conforman el SITARD.

**PALABRAS CLAVE:** Agua Residual Doméstica, Sistema de Tratamiento Individual, Unidad Habitacional, Zona Rural, DBO, DQO, SST, Aceites Grasas.

## INTRODUCCIÓN

El uso del agua para las actividades domésticas, además de las agrícolas e industriales, y la falta de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas ha sido un factor determinante en la crisis de la disponibilidad del recurso hídrico y su contaminación, este último se debe a la falta de saneamiento básico en las zonas rurales o en sectores vulnerables de la población, las cuales se abastecen del agua aleñada a la comunidad para la cocina, higiene personal, lavado, recreación y disposición [1].

En las zonas rurales de Colombia, las viviendas que no cuentan con un sistema de tratamiento de agua adecuado acuden a diferentes alternativas que representan un costo y no aseguran la calidad del agua, como es el caso de la conexión ilegal a las redes públicas, uso de tanques sépticos o el vertimiento directo a ríos, lagos o pozos. La disposición de los vertimientos de agua residual doméstica, sin un previo tratamiento, genera problemas de salud pública debido a enfermedades infecciosas, ya que el hombre se convierte en un consumidor directo e indirecto, puesto que se emplea agua no tratada para el riego de cultivos y como fuente de bebida para los animales de consumo y problemas ambientales, que alteran los ecosistemas acuáticos y del suelo debido a la presencia de contaminantes que alteran la composición, además, de no cumplir con la normatividad ambiental para los vertimientos [1 – 3].

La alternativa implementada en las zonas rurales, como se mencionó anteriormente, son el uso de tanques sépticos por su fácil acceso y costo, sin embargo, la acumulación de lodos generado por el agua residual doméstica evita que los procesos de descomposición de la materia orgánica se lleven a cabo correctamente, generando olores ofensivos, saturación del sistema, desbordamiento y la aparición de vectores [4].

La propuesta de diseño se realiza con la finalidad de ofrecer una alternativa de tratamiento de los vertimientos de agua residual doméstica generados en las viviendas de la zona rural de Colombia que no cuentan con un tratamiento, no están

interconectadas a una planta de tratamiento o solo cuentan con un tanque sépticos, y así, se pueda dar cumplimiento con la Resolución 0631 del 2015 y disminuir la carga contaminante que afecta el recurso hídrico y los suelos.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Proponer un diseño de un sistema individual de tratamiento de agua residual doméstica para una unidad habitacional de la zona rural en Colombia.

### **Objetivos específicos**

1. Diagnosticar el estado del agua residual doméstica en la zona rural.
2. Diseñar prototipo de Sistema Individual de Tratamiento de Agua Residual Doméstica.
3. Evaluar el diseño propuesto a partir de un modelo hidrodinámico mediante el uso de un software.

## 1. MARCO TEÓRICO

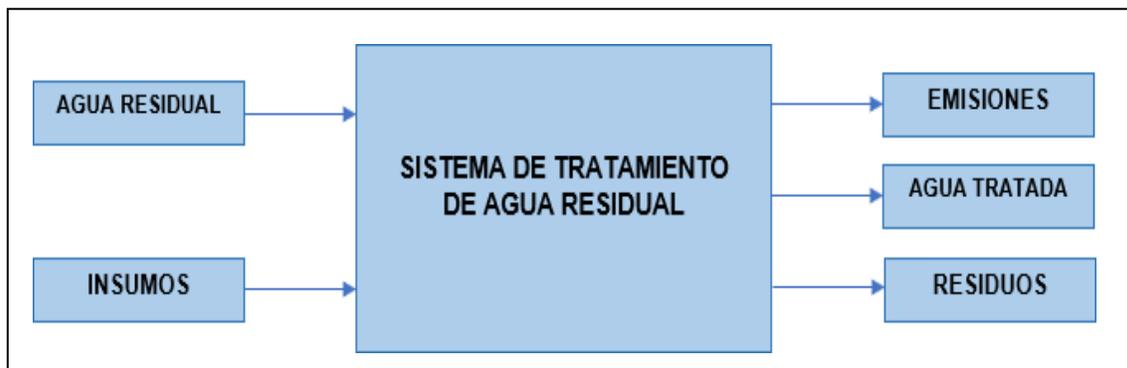
En el presente capítulo se describirán los conceptos y principal función de los tipos de tratamiento, que pueden aplicarse para tratar el agua residual doméstico generada por una unidad habitacional, a partir de la recopilación de información de diferentes fuentes bibliográficas en el marco teórico.

### 1.1. Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales (STAR)

Los tratamientos de aguas residuales se implementan con el propósito de disminuir la concentración o carga contaminante que presenta un vertimiento con el fin de disminuir el impacto ambiental que conlleva el no tratar el agua residual y de cumplir los límites o valores de aceptación de los parámetros establecidos en la normatividad ambiental. En la **figura 1**, se muestra el propósito de un SITAR, el cual a partir del ingreso el agua residual e insumos y genera, emisiones atmosféricas, residuos sólidos (lodos) y lo más importante, agua tratada; este sistema se compone por una o varias unidades de tratamiento.

**Figura 1.**

*Esquema conceptual del Sistema de Tratamiento de Agua Residual*



**Nota.** Explicación gráfica del propósito de la implementación de un sistema de tratamiento de agua residual y los subproductos que genera. Tomado de: A. Noyola, J. M. Morgan-Sagastume y L. P. Gúereca. *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales*, 1a ed. México: Universidad Nacional Autónoma de México - Instituto de Ingeniería, 2013.

Los sistemas de tratamiento de agua residual se componen por una secuencia de operaciones y procesos en los tratamientos preliminares, primarios, secundarios y terciarios, que se implementan de acuerdo con las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua y del grado de purificación que se desee lograr [5,6].

Los procesos que se implementan en un tratamiento de agua se clasifican de acuerdo con la **tabla 1**.

**Tabla 1.**

*Clasificación de las operaciones y procesos en un tratamiento de agua residual.*

<b>Clasificación</b>	<b>Descripción</b>
Operaciones Unitarias (Físicos)	Remoción de los compuestos contaminantes mediante acción de fuerzas físicas como los son la suspensión, rejillas, trituración, sedimentación y filtración.
Procesos Unitarios (Químicos)	Remoción, eliminación o conversión de los compuestos contaminantes mediante la aplicación de productos químicos y la generación de reacciones. Para este caso, aplica la precipitación, adsorción y desinfección.
Procesos Biológicos	Eliminación de los compuestos contaminantes orgánicos biodegradables como lo son el nitrógeno y fosforo mediante a actividad biológica de microorganismos.

**Nota.** Información de las operaciones y procesos en los tratamientos de agua. Tomado de: J. M. Lizarazo y M. I. Orjuela, *Sistemas de plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia*, tesis esp. Facultad de Medicina, Especialización en Administración en Salud Pública, Bogotá, Colombia, 2013.

Los pretratamientos y tratamientos primarios tienen el propósito de eliminar, mediante las operaciones unitarias, compuestos que pueden altera o dañar etapas posteriores de los sistemas de tratamiento; en caso de los tratamientos secundarios, remueven los sólidos remanentes y material orgánico degradable a partir de procesos unitarios y biológicos, y los tratamientos terciarios, se encargan de los procesos de refinamientos combinado las operaciones y procesos unitarios [5].

A continuación, se explica con mayor profundidad los tipos de tratamientos de agua residual:

## **1.2. Tipos de Tratamiento de Aguas Residuales**

El tratamiento del agua residual doméstica se divide en: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario [8].

### **1.2.1. Pretratamientos**

Los pretratamientos de las aguas residuales cumplen la función de eliminar los compuestos gruesos, arenosos y grasa del efluente, que pueden afectar los tratamientos posteriores, como lo es el funcionamiento correcto de los equipos e instalaciones depuradores. Comúnmente se realiza la eliminación a partir de rejillas, el cual retiene el material con un tamaño excesivo, y posterior a ello, se efectúa un tamizado que retiene el material en suspensión [8].

**1.2.1.i Cribado:** Reduce el contenido de sólidos de diámetro diferente mediante el uso de rejillas, las cuales retiene el material que flota o se encuentra suspendido en el agua, realizándose de manera manual y mecánica. A partir de este método, se clasifica el material en fino y grueso, por este motivo, para el material fino, se emplean rejillas con diámetros entre 6 a 12 mm y para el grueso, entre 12 a 25 cm [7-9].

**1.2.1.ii Desarenador:** Permite retirar sólidos granulométricos como la arena, cenizas y grava, que al acumularse puede dañar los equipos de las etapas posteriores y, además, puede llegar a obstruir el paso del agua tapando los orificios, tuberías, canales y tanques debido a su sedimentación. El desarenador puede ser de forma circular o rectangular [7-9].

**1.2.1.iii Homogenización:** Se emplean tanques con el fin de regular o disminuir los efectos de las concentraciones de las aguas residuales. Son depósitos que tiene la capacidad para retener el caudal del agua que genera que su flujo sobrepase el volumen de las operaciones posteriores [7].

### **1.2.2. Tratamientos Primarios**

Los tratamientos primarios se caracterizan por permitir la eliminación de material grueso y visible presente en el agua residual, debido a que genera problemas en los equipos de los demás tratamientos y por principios estéticos de la fuente receptora del vertimiento. Remueve principalmente sólidos o basuras, partículas sedimentables, grasas, sólidos flotantes o espuma [6].

Los tratamientos primarios permiten la remoción de los sólidos suspendidos presentes en el agua residual a partir de una sedimentación, coagulación y floculación [7].

**1.2.2.i Sedimentación:** Permite que los sólidos más pesados precipiten por acción de la gravedad separándose del agua por la diferencia de densidad, es decir, que remueve del agua residual la fracción de sólidos sedimentables. Se considera una operación fácil y de bajo costo, su funcionamiento depende de la altura, tiempo de retención y el tipo de sección transversal del tanque [7-9].

**1.2.2.ii Coagulación y Floculación:** El proceso de coagulación y floculación permite retirar los sólidos suspendidos y partículas coloidales. El primer proceso, coagulación, genera la desestabilización de las partículas coloidales suspendidas y el segundo proceso, floculación, genera la aglomeración por medio de la colisión de las partículas, siendo así, un proceso de separación líquido-sólido. Principalmente busca eliminar aceites, grasas y facilitar el proceso de aglutinación de sólidos suspendidos [7-9].

**1.2.2.iii Remoción de grasa y aceites:** Su principal función consiste en eliminar toda la grasa, aceite, espuma y material flotante, el proceso de desaceitado consiste en una separación líquido-líquido y el desgrasado en una separación sólido-líquida, para ello es necesario implementar zonas de reposos en la que se acumulen para facilitar su evacuación [8,9].

**1.2.2.iv Digestión Primaria de lodos:** Los lodos son el producto de la sedimentación primaria, es decir, están compuestos por partículas sólidas y agua; se caracterizan por generar olores ofensivos debido a su rápida descomposición y putrefacción, por ello, la digestión requiere de tiempos de retención y remoción [8].

### **1.2.3. Tratamientos Secundario**

Los tratamientos secundarios tienen el propósito de reducir la materia orgánica presente en el agua residual después de pasar por pretratamientos y el tratamiento primario, y se emplea como un proceso de auto purificación. Se denominan también tratamientos biológicos, ya que ocurre una oxidación de la materia orgánica biodegradable por acción de bacterias, en este proceso también se elimina la carga microbiológica contaminante y se eliminan los sólidos suspendidos dentro del agua [7,8].

**1.2.3.i Lodos Activados:** Los lodos son el producto de la formación de una masa que contiene microorganismo en estado activo con el fin de estabilizar el desecho orgánico. Una vez el agua residual es tratada con este lodo, se separa mediante sedimentadores secundarios [6].

**1.2.3.ii Biomasa Adherida:** Los microorganismos están adheridos a un soporte plástico o material inerte con el fin de estabilizar la carga orgánica del agua residual, disminuyendo la cantidad de materia orgánica biodegradable y sólidos sedimentados [6].

### **1.2.4. Tratamientos Terciarios**

El tratamiento terciario se encarga de remover y eliminar los sólidos suspendidos, nutrientes, materia orgánica biodegradable y no biodegradable, patógenos, además de eliminar el color y olor indeseables, compuestos químicos como lo son los detergentes, fosfatos y nitratos, que no fueron eliminados en los tratamientos anteriores. Dentro de estos métodos se encuentra la clarificación, filtración particulada, adsorción, microfiltración y la ultrafiltración [8,10].

**1.2.4.i Desinfección:** Para la desinfección del agua, comúnmente se utiliza la cloración para lograr la purificación del agua, de manera dosificada para evitar el desarrollo de microorganismos, e inclusive llevar al agua a su estado potable, ya que el cloro o sus derivados (hipoclorito de sodio, hipoclorito de calcio) actúan como oxidantes que destruyen las células contaminantes al romper su pared celular . Dentro de este tratamiento, se encuentra la ozonización, empleado como alternativa de la cloración, el cual funciona como un oxidante eliminados microorganismos, incluyendo los coliformes, sin embargo, por su vida útil, impide el almacenamiento y generarlo en el lugar de tratamiento, comúnmente se emplea la fotoquímica, radioquímica y descarga eléctrica para su generación [8,11].

**1.2.4.ii Filtración:** Permite la separación de sólidos y líquidos empleando un medio granular o poroso, el cual retiene el sólido en espacio intersticial entre el lecho filtrante y permite el paso del líquido, comúnmente es de grava, arena, antracita, carbón activado, entre otros, haciendo pasar el filtro acción de la gravedad o por medio de presión [8,12].

Los mecanismos que permiten la remoción de los sólidos o material dentro del filtro son:

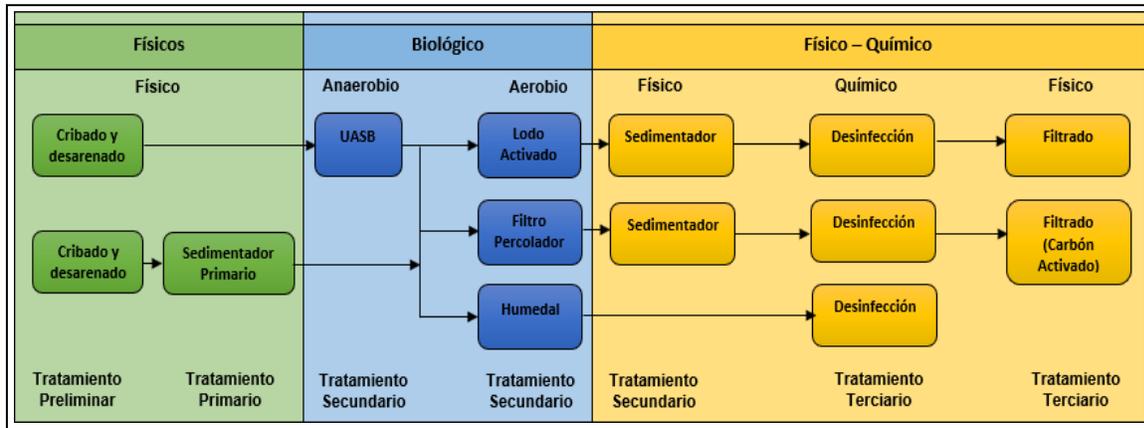
- Colado: los sólidos o partículas mayores que el medio filtrante son colada, esto puede ser de manera mecánica o por contacto ocasional [13].
- Sedimentación: los sólidos sedimentan en el medio filtrante [13].
- Impacto: los sólidos pesados no siguen la línea del filtro [13].
- Intercepción: los sólidos que se mueven en la línea de flujo se remueven al entrar en contacto con la superficie del medio filtrante [13].
- Adhesión: los sólidos se adhieren a la superficie del medio filtrante a medida que pasa el fluido [13].
- Adsorción: los sólidos que han hecho contacto con la superficie u otra partícula sólida, será capaz de ser retenida allí; puede darse una adsorción química (interacción química) o física (fuerzas electrostáticas, electrocinéticas o por fuerzas de Van Der Waals) [13].

- Floculación: los sólidos más grandes atraen a los más pequeños, formando sólidos más grandes [13].

En la **figura 2**, se muestra las diferentes rutas de un tren de tratamiento, que pueden aplicar o combinar unidades de tratamiento, explicadas anteriormente, siguiendo los procesos físicos, químicos y biológicos, establecidos, para el tratamiento del agua residual.

**Figura 2.**

*Integración de trenes de tratamiento de aguas residuales.*



**Nota.** Explicación gráfica de las diferentes combinaciones de los tratamientos de agua residual y los subproductos que genera. Tomado de: A. Noyola, J. M. Morgan-Sagastume y L. P. Gùereca. *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales*, 1a ed. México: Universidad Nacional Autónoma de México - Instituto de Ingeniería, 2013.

## **2. DIAGNÓSTICO DEL AGUA RESIDUAL DOMESTICA EN COMUNIDADES RURALES DE COLOMBIA**

En el presente capítulo se describirán las condiciones de la calidad del agua en Colombia, la cobertura de acueducto, alcantarillado e implementación de Sistemas de Tratamiento de Agua Residual (STAR) limitando el proyecto al vertimiento de aguas residuales domésticas generados en las zonas rurales de Colombia a partir de la recopilación de información y los parámetros de calidad del agua establecidos para su respectiva comparación con la normatividad colombiana para vertimientos (resolución 0631 del 2015).

La metodología aplicada para la búsqueda de información para el desarrollo del capítulo consistirá en una búsqueda categorizada mediante la selección de palabras claves, aplicando: una cobertura, en el cual se abarca el contexto geográfico de las zonas rurales de Colombia, la tipología de documentos, que incluye una revisión a artículos, tesis e informes técnicos en formato digital a partir de las fuentes de información: SCIELO, Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, Ministerios de Salud y Protección Social, Departamento Nacional de Planeación, Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, además de la base de universidades de Colombia.

### **2.1. Calidad del Agua en Colombia en la zona rural**

El recurso hídrico y su disponibilidad es un componente de importancia para la vida y su desarrollo en cualquier lugar del mundo, por lo que debe repartirse a todos los usuarios que lo habitan; este recurso se obtiene a partir de las aguas superficiales o subterráneas, y su respectivo uso, depende de factores como lo es la disponibilidad en el lugar. Existen casos en donde la demanda del agua puede llegar a superar la oferta, por lo que se implementan recursos no convencionales como lo son el agua de lluvia, desalinización del agua de mar o el tratamiento de agua residual, este último, refleja su importancia, debido a que presenta una relación entre el uso de aguas residuales sin tratar y problemas sanitarios existentes [14].

El agua es un factor influyente en la salud del ser humano, ya que en la actualidad productos farmacéuticos, cosméticos y químicos se han ido incorporando en las aguas superficiales por medio de las aguas residuales que son vertidas sin tratar o con un tratamiento insuficiente, lo que ha generado su contaminación. Una manera de verificar el estado del agua es partir del indicador de la calidad del agua, que es el resultado de comparar características físicoquímicas y biológicas del agua con los parámetros normativos que regulan el vertimiento o cuerpo de agua [14-16].

El deterioro de la calidad del agua es un problema ambiental debido a que su contaminación microbiológica y química causa de la transmisión de enfermedades y genera infecciones en el ser humano que la consume, además de que ocasiona las pérdidas de los ecosistemas acuáticos; estos son problemas que reducen la posibilidad de su uso a nivel residencial o industrial [14].

En Colombia, para el año 2012, el acceso al agua presentó una cobertura de agua potable del 92% a nivel nacional, con un 99% de cobertura en la zona urbana y del 72% de la zona rural, demostrando que existe porcentaje de población alto en la zona rural que no cuenta con el acceso a agua potable, repercutiendo directamente en la calidad de agua que afecta a la población; por este motivo, el país ha promovido la implementación de sistemas de vigilancia de la calidad del agua para consumo con el fin de evaluar el riesgo en la salud pública [15].

El índice del riesgo de la calidad del agua para consumo humano (IRCA) permite determinar el grado de riesgo de ocurrencia de enfermedades asociadas con el no cumplimiento de características físicas, químicas y microbiológicas del agua para el consumo; este índice es un dato cuantitativo en porcentaje que permite, a través de su medición, garantizar el cumplimiento de sus características de acuerdo con la normatividad [16].

Para determinar el nivel de riesgo del IRCA, se establece un rango de porcentajes que determine el nivel y la clasificación, como se muestra en la **tabla 2**.

**Tabla 2.**

*Clasificación del IRCA*

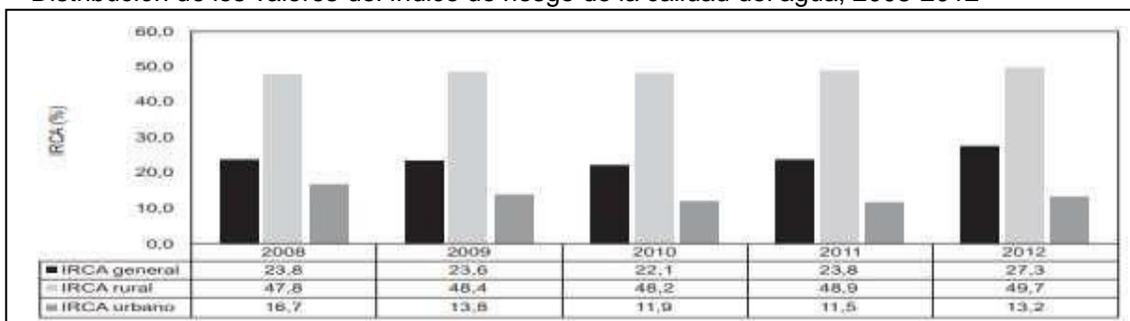
IRCA (%)	Nivel del riesgo	Clasificación
0 – 5	Sin riesgo	Apta para consumo
5,1 – 14	Bajo	No apta para consumo
14,1 – 35	Medio	
35,1 – 80	Alto	
80,1 – 100	Inviabile Sanitariamente	

**Nota.** Clasificación del IRCA para determinar el nivel del riesgo y de su clasificación. Tomado de: J. F. Rojas, V. L. Robayo y D. C. Córdoba, “*Calidad del Agua: Normatividad – Reporte de Información al SUI – Diagnóstico nacional,*” Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2ª ed. 2017.

De acuerdo con esta clasificación, en el periodo comprendido entre el año 2008 al 2012, en la zona rural, 825 de los 1102 municipios de Colombia, reportaron información sobre la calidad del agua, evidenciando falta de vigilancia, sumando a esto, 565 municipios, presentaron un porcentaje de clasificación de riesgo alto y solo en 79 municipios presentaron buenas condiciones en la calidad del agua para consumo, es decir, sin presentar riesgo, estos datos se reflejan en la **figura 3**, donde se muestra que el IRCA es superior en la zona rural en el intervalo comprendido entre el 2008 al 2012, superando al IRCA de la zona urbana y el general, y en **figura 4**, el nivel de riesgo repartido a cada uno de los departamentos en el mapa de riesgo [15].

**Figura 3.**

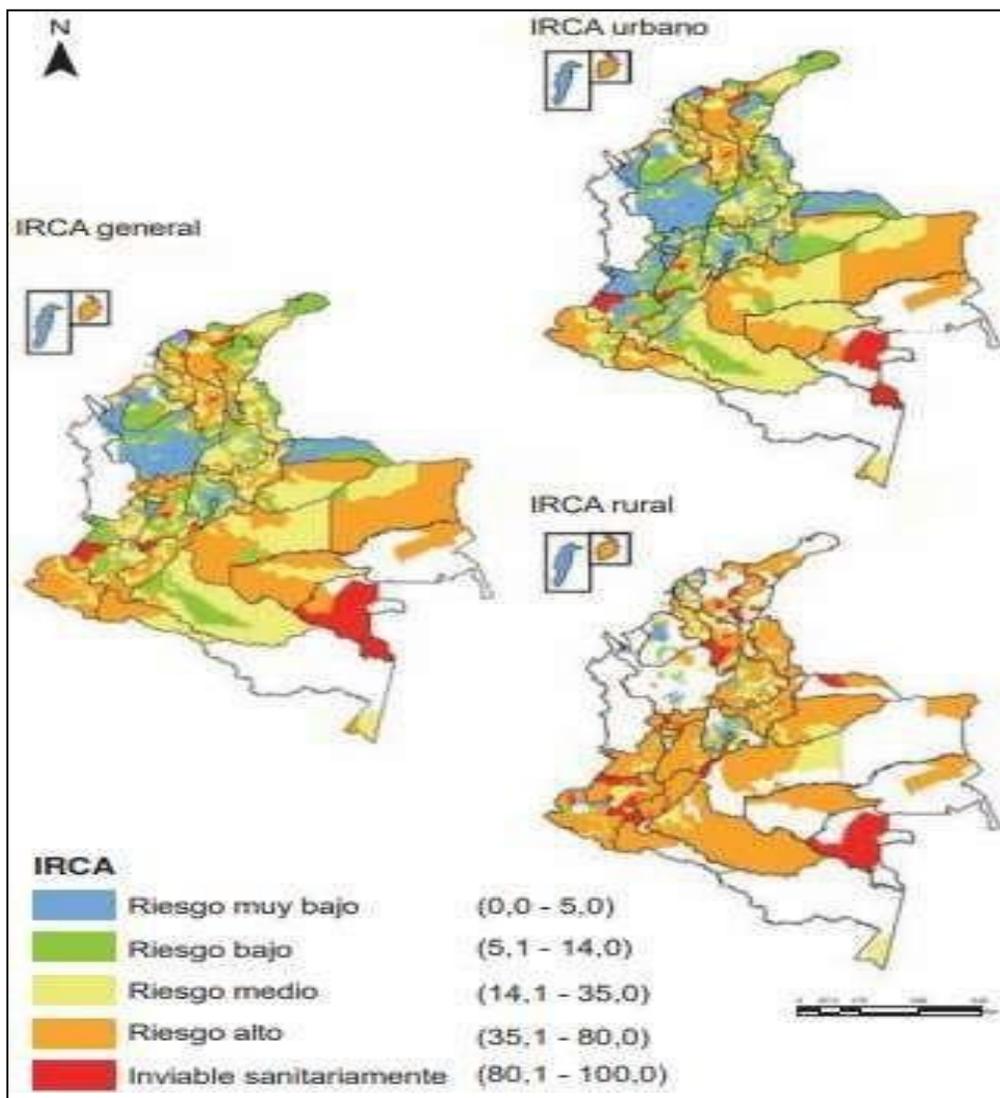
Distribución de los valores del índice de riesgo de la calidad del agua, 2008-2012



**Nota.** Distribución del IRCA en la zona urbana, zona rural y en general en Colombia en el periodo comprendido entre el 2008 al 2012. Tomado de: B. L. Guzmán, G. Nava y P. Díaz, “*La calidad del agua para consumo humano y su asociación con la morbimortalidad de Colombia, 2008-2012,*” *Biomédica*, vol. 35, pp. 177-190, 2015.

**Figura 4.**

Distribución de la clasificación del índice del riesgo de la calidad del agua (IRCA) por municipios y por zona rural o urbana, Colombia, 2008-2012, mapa de riesgo.



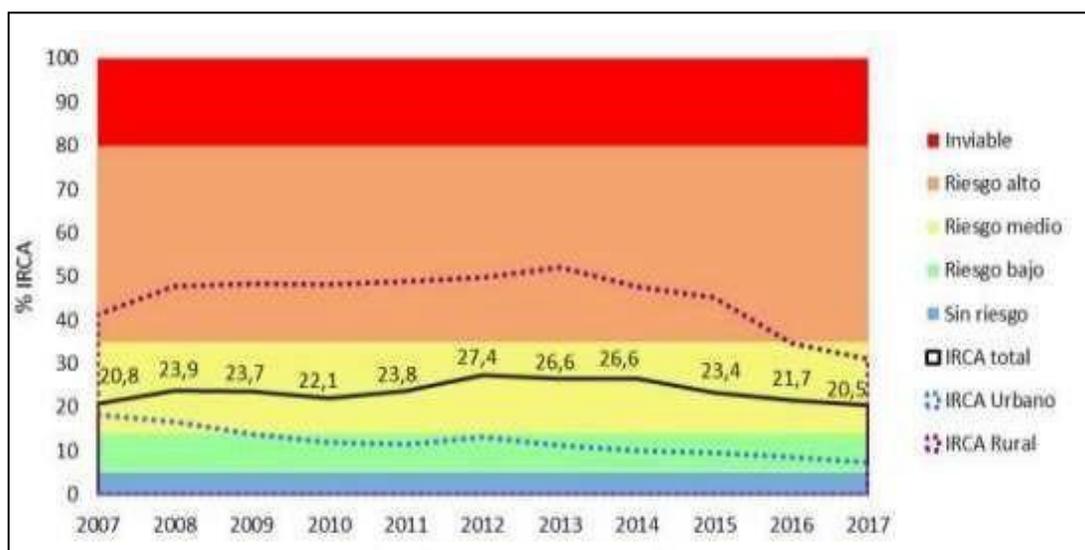
**Nota.** Representación gráfica por medio del mapa de Colombia de la clasificación del IRCA en los departamentos de Colombia. Tomado de: B. L. Guzmán, G. Navay P. Díaz, "La calidad del agua para consumo humano y su asociación con la morbimortalidad de Colombia, 2008-2012," *Biomédica*, vol. 35, pp. 177-190, 2015.

Para el año 2017, a nivel nacional, el IRCA total fue de 20,5%, clasificándose en un riesgo medio, sin embargo, para la zona rural, el porcentaje fue de 31,1%, evidenciando una mejora al salir del riesgo alto para clasificar dentro del riesgo medio, pero con la misma clasificación de agua no apta para consumo, mientras que la zona

urbana con un porcentaje de 7,4%, presenta un riesgo bajo, lo que comprueba la mejora en la calidad del agua comparada con la zona rural, ya que presentan una brecha en el porcentaje del IRCA. En la **figura 5**, se muestra que la zona rural ha presentado una mejoría en la calidad del agua en el periodo del 2013 al 2017, pero no suficiente para alcanzar la calidad del agua de las zonas urbanas e inclusive superando el IRCA tanto urbano como el total [17].

**Figura 5.**

*Comportamiento del IRCA nacional, Colombia 2007 – 2017.*

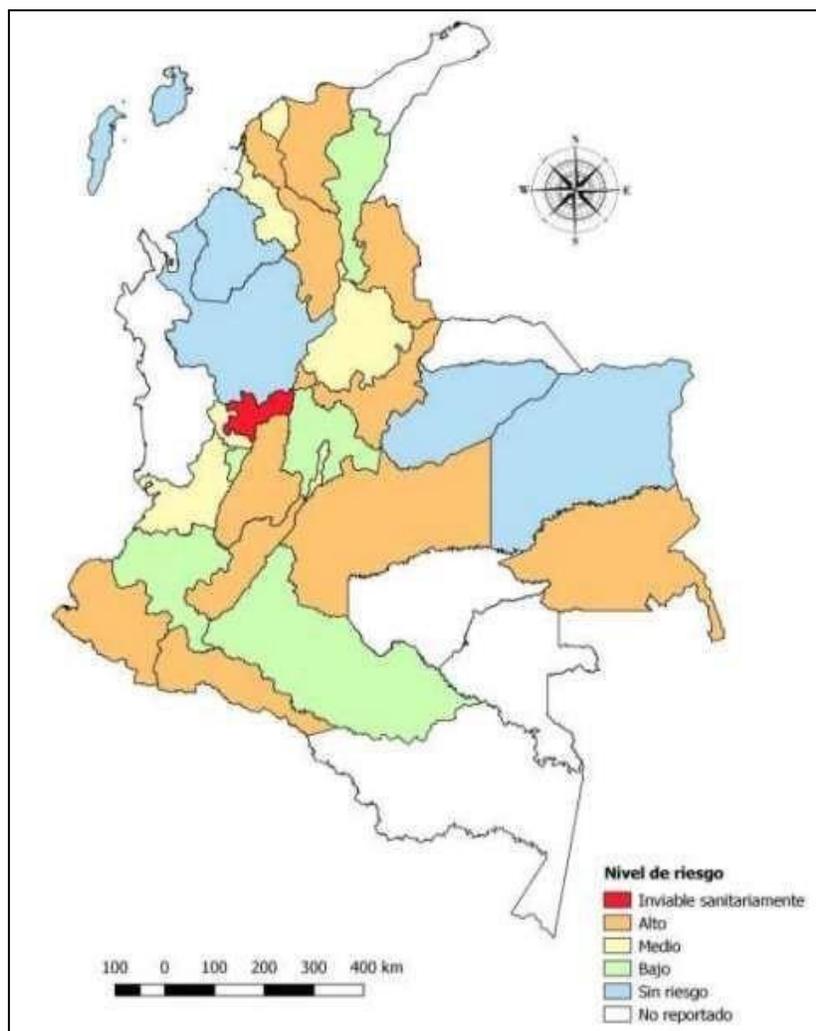


**Nota.** Comparación de la evolución del IRCA en total, en la zona urbana y rural de Colombia. Tomado de MINISTERIO DE SALUD Y PROTECCIÓN SOCIAL, “Informe Nacional de la Calidad del Agua para Consumo Humano – INCA 2017,” MINISTERIO DE SALUD Y PROTECCIÓN SOCIAL, 2019.

En la **figura 6**, se evidencia que el nivel de riesgo de la calidad del agua en la zona rural de Colombia a nivel departamental, de acuerdo con la información recopilada por el Instituto Nacional de Salud a cargo del Ministerio de salud y protección social en el año 2017, para el total de los 32 departamentos, 5 de ellos presentaron agua sin riesgo, 5 riesgo medio, 10 riesgo alto y 1 es inhabitable sanitariamente, de los demás departamentos no se cuenta con información, como se especifica de igual manera en la **tabla 3** [17].

**Figura 6.**

*Niveles de riesgo departamental por zona rural, Colombia 2017.*



**Nota.** Determinación del nivel de riesgo en la zona rural en los diferentes departamentos de Colombia. Tomado de: MINISTERIO DE SALUD Y PROTECCIÓN SOCIAL, “Informe Nacional de la Calidad del Agua para Consumo Humano – INCA 2017,” MINISTERIO DE SALUD Y PROTECCIÓN SOCIAL, 2019.

**Tabla 3.**

Resultados IRCA por departamento en la zona rural, Colombia, 2017.

Nivel de Riesgo	Clasificación agua para consumo	Total de Departamentos	Departamentos
Inhabitable Sanitariamente	No apta	1	Caldas
Alto	No apta	10	Magdalena, Bolívar, Norte de Santander, Boyacá, Meta, Huila, Tolima, Putumayo, Nariño, Guainía.
Medio	No apta	5	Valle del Cauca, Risaralda, Santander, Atlántico, Sucre.
Bajo	No apta	5	Cesar, Cundinamarca, Cauca, Quindío, Caquetá.
Sin riesgo	Apta	5	Vichada, Casanare, Córdoba, Antioquia, Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina.
No reportado	-	6	La Guajira, Chocó, Guaviare, Vaupés, Amazonas, Arauca.

**Nota.** Determinación del nivel de riesgo por departamentos en Colombia. Tomado de: MINISTERIO DE SALUD Y PROTECCIÓN SOCIAL, “Informe Nacional de la Calidad del Agua para Consumo Humano – INCA 2017,” MINISTERIO DE SALUD Y PROTECCIÓN SOCIAL, 2019.

Para el año 2018, por medio del CONPES 3918 “Estrategia para la implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en Colombia”, se estableció metas en torno al sexto objetivo (Agua limpia y Saneamiento) para el acceso de agua en la zona rural y urbana de Colombia como se ilustra en la **tabla 4** [18-21].

**Tabla 4.**

*Metas Nacionales en Alcantarillado y Tratamiento de aguas residuales.*

<b>Nombre del indicador</b>	<b>Línea base 2015</b>	<b>Meta intermedia a 2018</b>	<b>Meta proyectada a 2030</b>
Acceso a agua potable en suelo urbano	97,3%	98,0%	100,0%
Acceso a agua potable en suelo rural	74,3%	76,6%	100,0%
Porcentaje de población con acceso a métodos de saneamiento adecuado	87,4%	89,0%	92,6%
Porcentaje de aguas residuales urbanas domésticas tratadas de manera segura	37,3%	41,0%	68,6%

**Nota.** Metas propuestas en Colombia para los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Tomado de: DPN, *CONPES 3918, ESTRATEGIA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLES (ODS) EN COLOMBIA*, Departamento Nacional de Planeación, Bogotá, 2018.

La meta propuesta para el 2018, para el acceso a agua potable, comprueba la brecha en la cobertura entre la zona rural y la zona urbana, lo que se relaciona con el IRCA, puesto que para a zona rural, la población que no cuente con agua potable es propensa a sufrir enfermedades infecciosas y parasitarias [15].

Adicionalmente a esto, de acuerdo con la información suministrada por el Instituto Nacional de Salud, el cual presenta datos recientes del IRCA para el año 2020, a pesar de no cubrir en su totalidad los departamentos de Colombia, estableció que a nivel nacional el IRCA es de 19,55% presentando un riesgo medio, mientras que para la zona urbana, con un 5,98% en el IRCA, corresponde a un riesgo bajo y la zona rural con un 34,53% se clasifica como riesgo medio, lo que implica que de acuerdo con los datos del 2017, suministrados por Ministerio de Salud y protección Social, la zona rural sigue obteniendo agua que no es apta para consumo y se encuentra sobre el límite de pasar a un riesgo alto [23].

## **2.2. Cobertura de Acueducto y Alcantarillado**

Con la finalidad de mejorar la calidad de vida de la población en Colombia, se tiene como objetivo las soluciones de las necesidades de agua potable y saneamiento, por este motivo es la responsabilidad de los municipios y distritos es garantizar la prestación efectiva de los servicios públicos de acueducto, alcantarillado y saneamiento básico [24].

Para este fin, en Colombia, para el año 2006, en la “Visión Colombia II Centenario: 2019”, se propuso como objetivos la cobertura de alcantarillado en el área urbana del 100% y para la rural del 75,2%, con el tratamiento del 50% de aguas residenciales vertidas [18].

De acuerdo con las metas establecidas en el año 2006 y 2018, se realiza una comparación con los datos obtenidos en el año 2017 en Colombia, debido a que se logró la cobertura del 97,4% del servicio público domiciliario de acueducto para el acceso a agua potable y el 73,2% para la zona rural, con un total de 92,4% de cobertura nacional. Por otro lado, para el mismo año, Colombia logro una cobertura del 92,4% de servicio público domiciliario de alcantarillado y el 70,1% para la zona rural con un total del 88,2% [22].

Sin embargo, estos valores son comparados con la cobertura de acueducto y alcantarillado del año 2018, establecidos por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, ya que establecen una cobertura inferior. A continuación, se profundiza el nivel de cobertura del sistema de acueducto y alcantarillado en la zona rural para el año 2018.

### **2.2.1. Cobertura del Acueducto**

La cobertura del acueducto es la relación entre los predios residenciales que tiene el acceso al servicio sobre el total de predios residenciales. Para el año 2018, Colombia tuvo una cobertura nacional para el servicio público del acueducto del 87,54% para la zona urbana y del 34,95% para la zona rural. En la **figura 7** se evidencia que la cobertura en la mayoría de los departamentos en la zona rural se encuentra entre el 0 al 20 %, lo que implica una menor cobertura en comparación con

la zona urbana en Colombia [24].

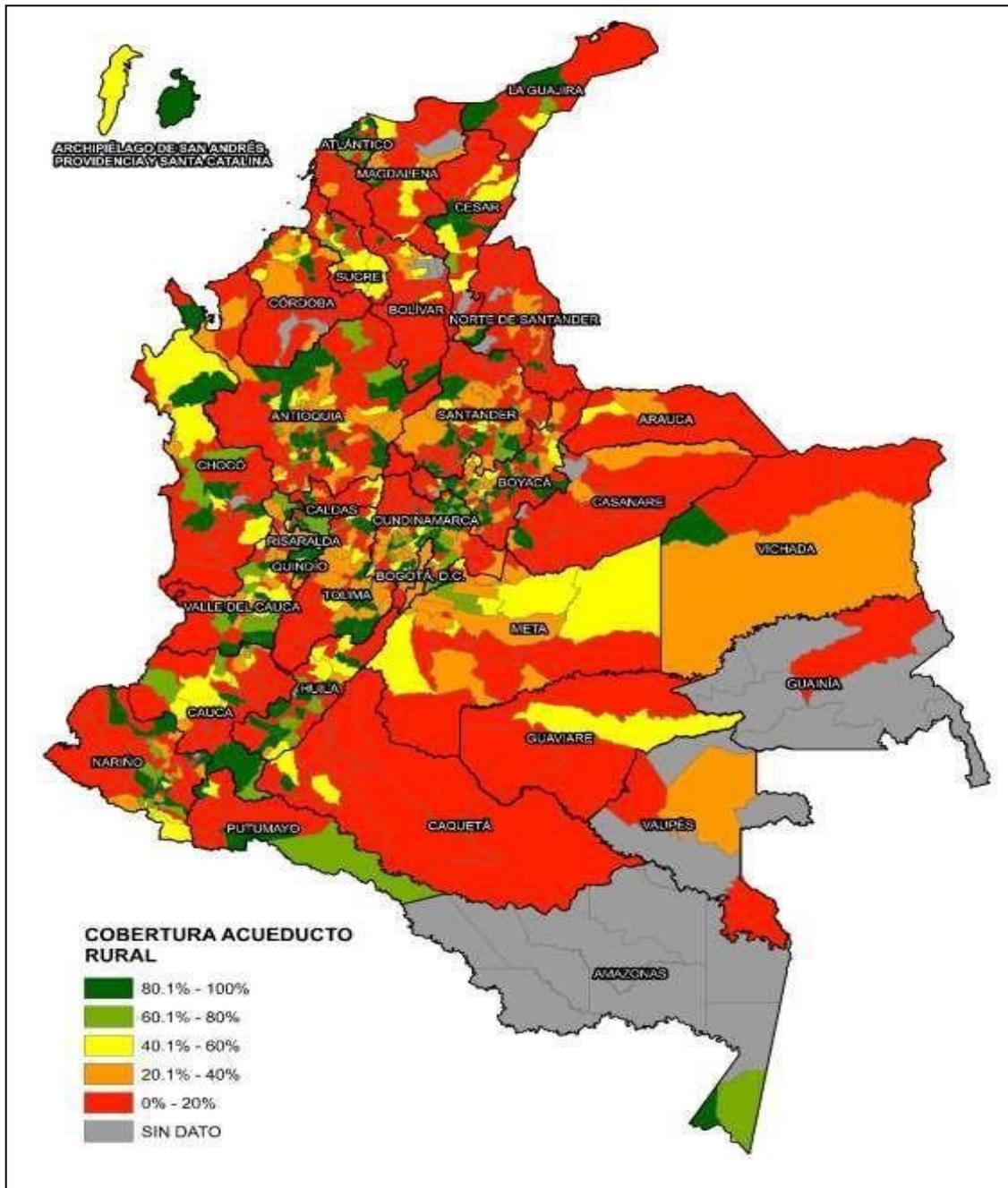
### **2.2.2. Cobertura del Alcantarillado**

Para el sistema de alcantarillado, el cual consiste en que la cobertura del alcantarillado es la relación entre los predios residenciales que tiene el acceso al servicio sobre el total de predios residenciales, en el año 2018, logro la cobertura nacional en Colombia del servicio público del 82,84 % para la zona urbana y el 14,36 % en la zona rural. En la **figura 8**, se evidencia la cobertura para la zona rural, la cual se encuentra dentro de un rango del 0 al 20%, al igual que la cobertura del acueducto [24].

En el análisis no se contempla la disposición del agua residual por medio de soluciones alternativas individuales como lo son los pozos sépticos como soluciones de saneamiento básico para la problemática ambiental de los hogares que no cuentan con un alcantarillado interconectado a una planta de tratamiento de aguas residuales [24].

**Figura 7.**

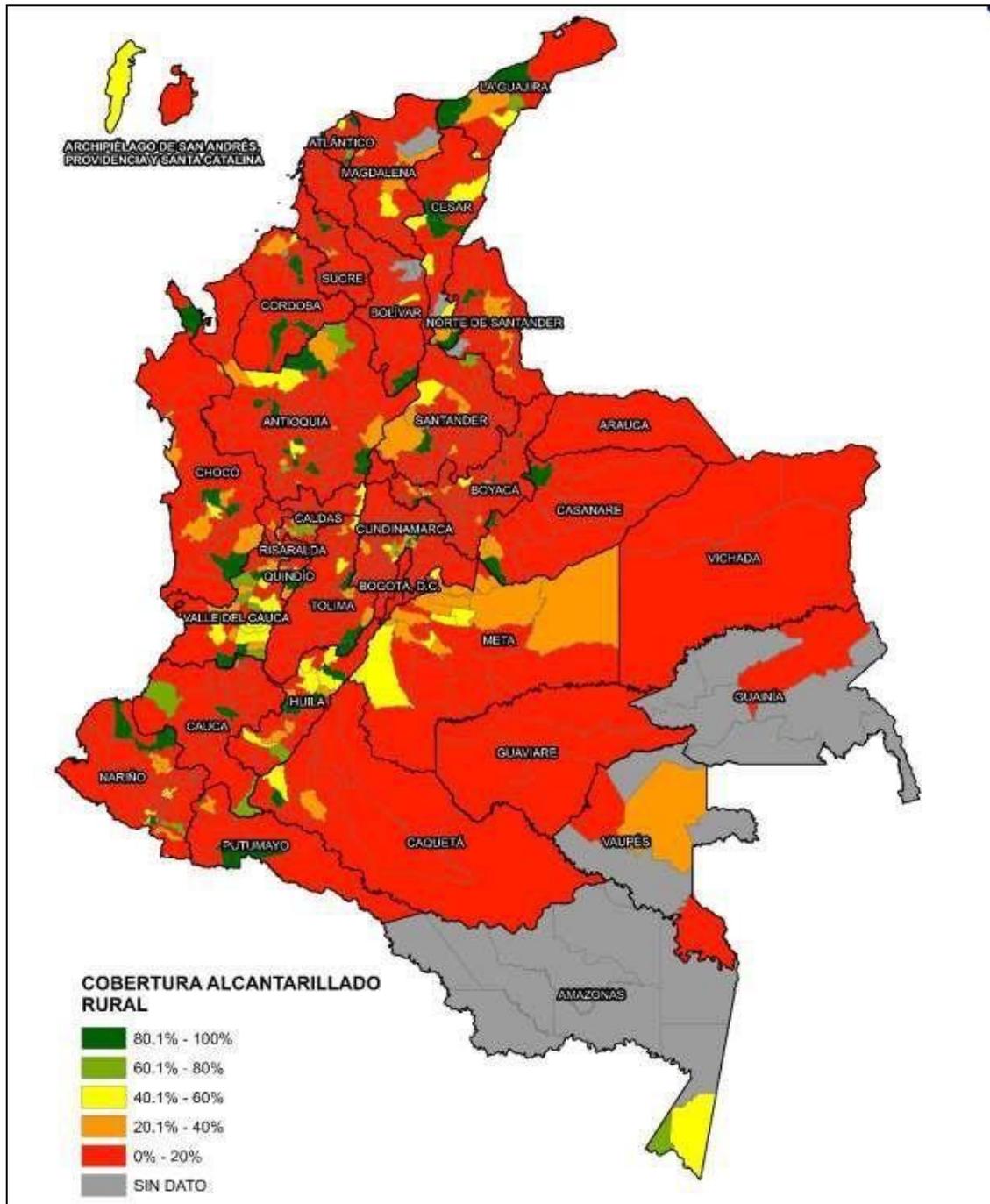
*Cobertura del servicio de acueducto 2018 en la zona rural.*



**Nota.** Cobertura del acueducto en las zonas rurales de los departamentos de Colombia en el año 2018. Tomado de: D. M. Castillo, et al, “*Estudio sectorial de los servicios públicos domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado 2018,*” Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2019.

**Figura 8.**

*Cobertura del servicio público de alcantarillado 2018 en el área rural.*



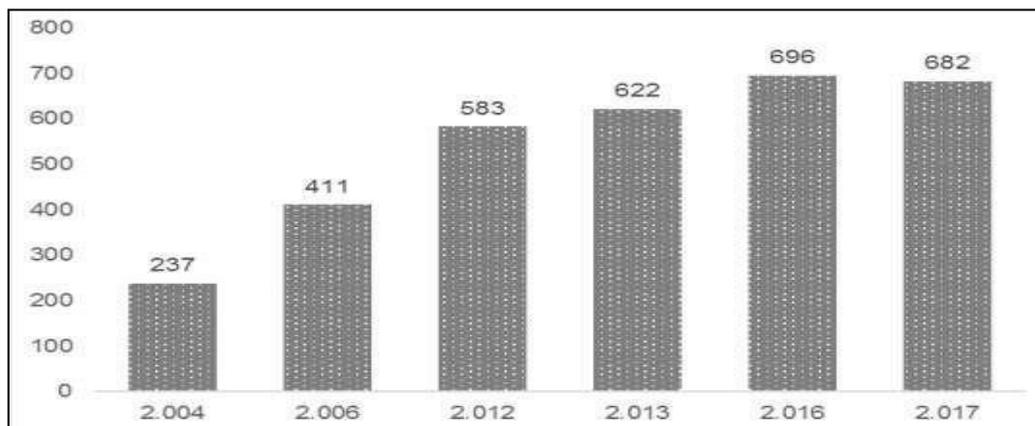
**Nota.** Cobertura del acueducto en las zonas rurales de los departamentos de Colombia en el año 2018. Tomado de: D. M. Castillo, et al, "Estudio sectorial de los servicios públicos domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado 2018," Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2019.

### 2.2.3. Cobertura de Sistemas de tratamiento de agua residual (STAR)

En el Plan director de agua y saneamiento básico visión estratégica 2018 – 2030, se determinó que en Colombia se cuenta con un nivel bajo de tratamiento secundario y terciario de aguas residuales que no permitirán alcanzar las metas propuestas para el cumplimiento de los Objetivo del Desarrollo Sostenible en Colombia, ya que el control de la contaminación del agua se dificulta porque el monitorio realizado a los vertimientos es bajo, se cuenta con tecnológicas insuficientes para el correcto tratamiento y porque existen usuarios no legalizados. Sin embargo, para el año 2017, se evidencio un aumento en la construcción de Sistemas de Tratamiento de Agua Residual (STAR), con un incremento de 682 para ese año, dato comparado con el año 2004, en el que solo se contaban con 237 STAR en el país, evolución que se ilustra en la **figura 9** [18,22].

**Figura 9.**

*Avance en el tratamiento de aguas residuales urbanas 2004 – 2017.*

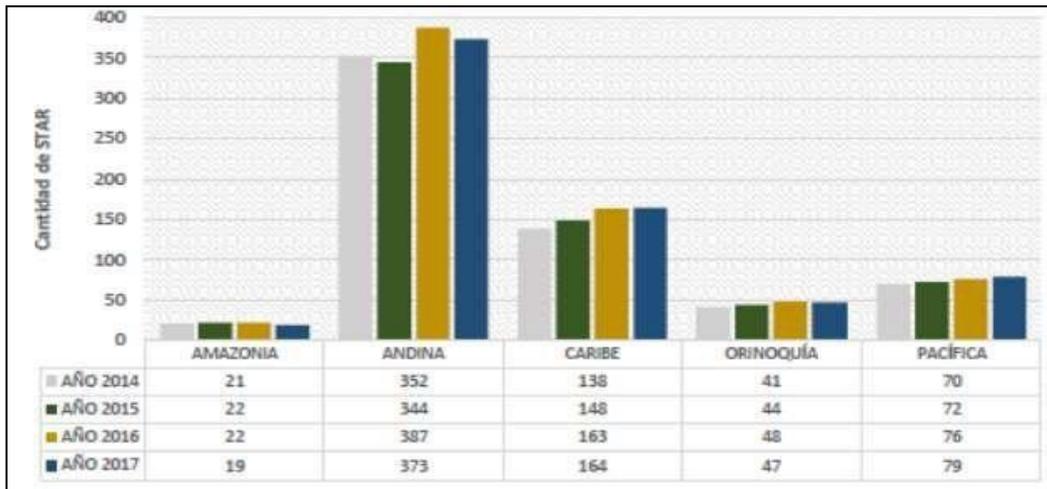


**Nota.** Número de Sistemas de Tratamiento de agua residual existentes en Colombia en el periodo 2004-2017. Tomado de: Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, “*Consulta Diagnóstico e Identificación de Problemas, Objetivos y Alternativas 2019: Documento de Avance de Análisis de Impacto Normativo,*” Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, 2019.

En la **figura 10** y **figura 11**, se muestra el número de STAR en las regiones y departamentos de Colombia respectivamente hasta el año 2017 [18].

**Figura 10.**

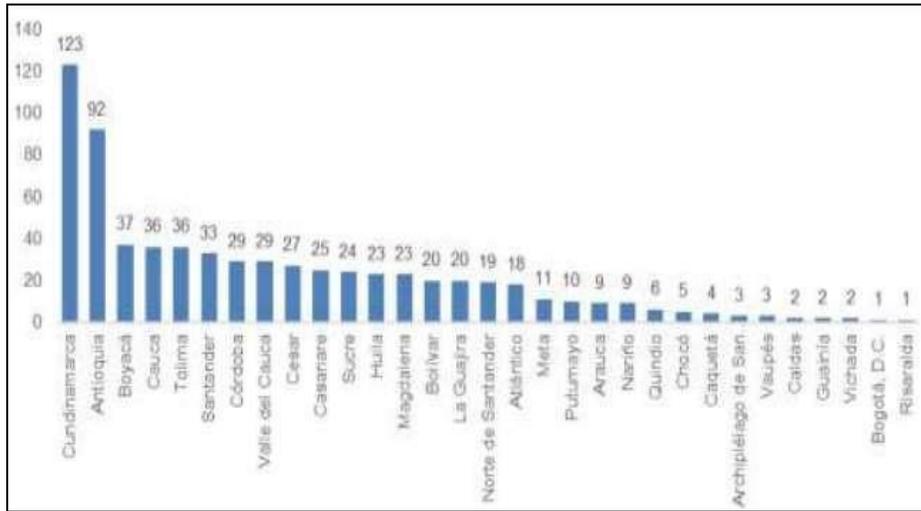
Número de STAR por regiones en Colombia.



**Nota.** Número de STAR en las diferentes regiones de Colombia en el periodo de 2014a 2017. Tomado de: Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, “Consulta Diagnóstico e Identificación de Problemas, Objetivos y Alternativas 2019: Documento de Avance de Análisis de Impacto Normativo,” Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, 2019.

**Figura 11.**

Número de STAR por departamentos en Colombia en el año 2017.



**Nota.** Número de STAR en los diferentes departamentos de Colombia en el año 2017. Tomado de: Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, “*Consulta Diagnóstico e Identificación de Problemas, Objetivos y Alternativas 2019: Documento de Avance de Análisis de Impacto Normativo,*” Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, 2019.

Para el año 2018, se identificó un total de 699 STAR, repartidas en los diferentes departamentos, como se muestra en la **tabla 5** y **figura 12**, incrementando en 17 STAR comparados con el año 2017, sin embargo, se evidencia el aumento y descenso para los diferentes departamentos.

**Tabla 5.**

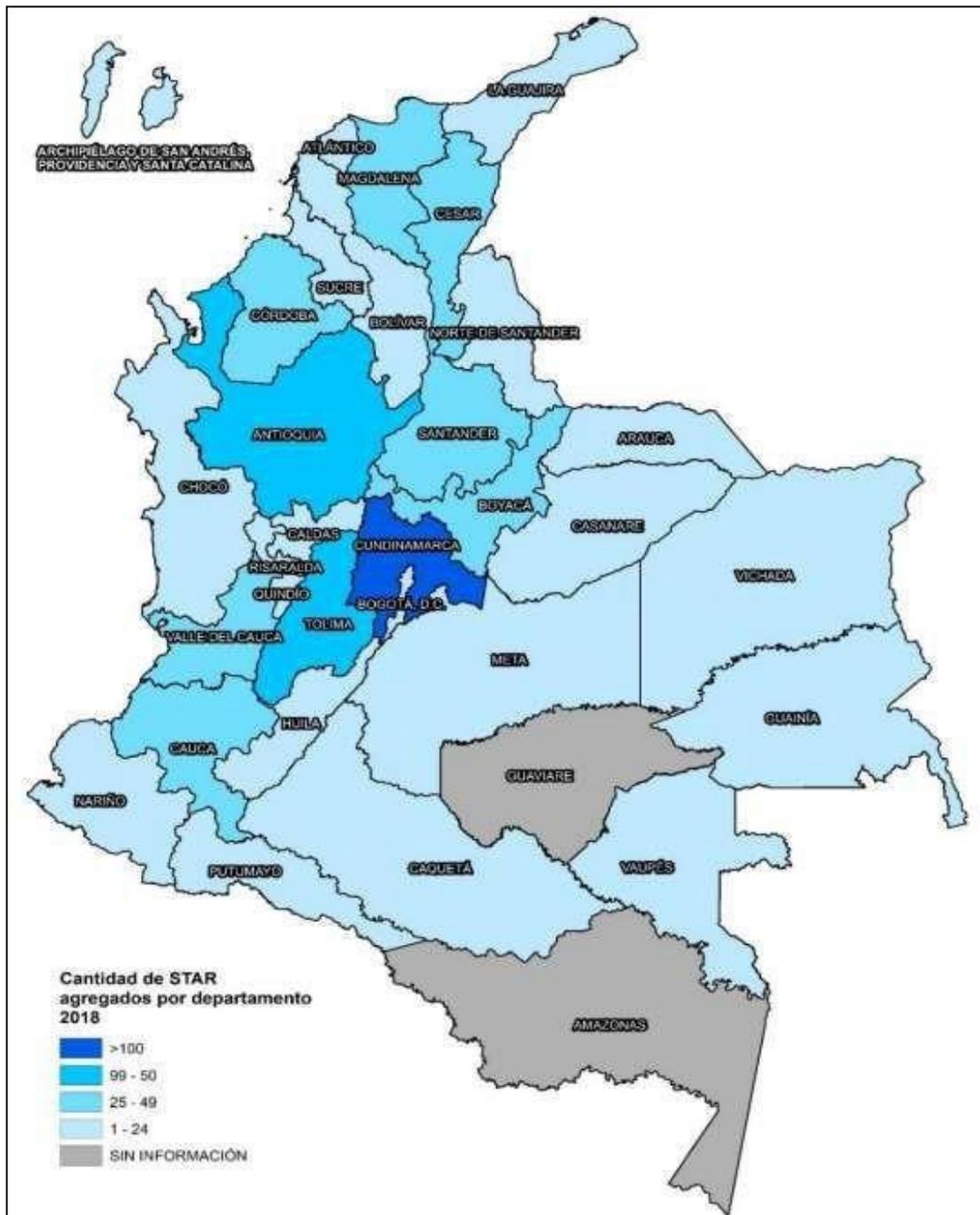
*Cantidad de STAR por departamento en el año 2018.*

<b>Departamento</b>	<b>Cantidad STAR</b>	<b>Departamento</b>	<b>Cantidad STAR</b>
Cundinamarca	119	Meta	12
Antioquia	90	Putumayo	10
Tolima	54	Araca	9
Cauca	37	Choco	9
Boyacá	35	Quindío	6
Santander	35	Nariño	6
Córdoba	30	Caquetá	4
Valle del Cauca	29	Vaupés	3
Cesar	28	Caldas	3
Magdalena	25	Archipiélago de San Andrés	3
Sucre	24	Guainía	2
Casanare	24	Vichada	2
Huila	21	Bogotá D.C.	1
Atlántico	21	Risaralda	1
La Guajira	20	Amazonas	-
Norte de Santander	19	Guaviare	-
Bolívar	17		

**Nota.** Número de STAR en los departamentos de Colombia. Tomado de: D. M. Castillo, et al, “Estudio sectorial de los servicios públicos domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado 2018,” Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2019.

Figura 12.

Cantidad de STAR por departamento en el año 2018.



**Nota.** Número de STAR por departamento en Colombia en el año 2018. Tomado de: D. M. Castillo, et al, "Estudio sectorial de los servicios públicos domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado 2018," Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2019.

En Colombia, a nivel nacional, el agua residual tratada incremento en un 34,6% en el periodo de 2002 y el 2017, sin embargo, el 51% del total de los municipios (1102) descargan las aguas residuales sin ningún tipo de tratamiento a fuentes hídricas, además de que se establece que 58 municipio no cuentan con sistema de alcantarillado, adicionalmente, para el año 2017, de acuerdo al Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico dentro de la recopilación de información, indico que solo el 42,6% de la aguas producidas fueron tratadas [18].

Por tal motivo, el motivo el proyecto de investigación propone el tratamiento del agua residual doméstica mediante el diseño de un Sistema Individual de Tratamiento de Agua Residual Doméstica (SITARD).

A continuación, se describe la composición del agua residual doméstica:

### **2.3. Agua Residual Doméstica**

Las aguas residuales domésticas se caracterizan por originarse como un producto de la descarga de los retretes, servicios sanitarios, sistemas de aseo personal, como lo son las duchas y lavamanos, área de las cocinas, del lavado para los utensilios de aseo, paredes, pisos y del lavadero para la ropa, provenientes de los hogares, residencias o viviendas [25].

La generación del agua residual domestica depende de los hábitos de consumos de agua, el tipo de sanitario, lavadora, entre otros equipos para el hogar que se utilice y los usos que se le dan al agua dentro de la vivienda. De acuerdo con Romero, el consumo de agua no debe los superar los 200 L/día por contribuyente (persona) con un 60-70% de uso para el baño, lavandería y cocina y del 30 a 40% restante para el sistema sanitario, estos pueden variar dependiendo del lugar de procedencia como se muestra en la **tabla 6**, estimando porcentajes diferentes [26, 27].

**Tabla 6.***Consumo de agua en una vivienda.*

<b>USO</b>	<b>Vivienda Plurifamiliar</b>	<b>Vivienda Unifamiliar</b>	<b>COLOMBIA</b>
Ducha	34%	21%	31 %
Inodoro	21%	13%	36 %
Lavamanos	18%	11%	-
Lavadora	10%	8%	14 %
Cocina	4%	2%	4 %
Lava vajillas	5%	4%	7 %
jardín	-	36%	8 %
Otros	8%	5%	-

**Nota.** Porcentaje de consumo de agua en una vivienda plurifamiliar, unifamiliar y una vivienda en Colombia. Tomado de: D. A. Zambrano, “*Minimización y Prevención como estrategia para el control de la contaminación por aguas residuales municipales en la zona expansión de Cali,*” Trabajo de Investigación, Facultad de Ingeniería, Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad del Valle, Santiago de Cali, 2010.

La unión de los diferentes usos del agua dentro de los hogares genera un afluente de agua residual que llega a convertirse en un vertimiento que contiene compuestos contaminantes manifestándose como sólidos, residuos orgánicos, detergentes, aceites y grasas, puesto que su composición contiene componentes físicos, químicos y biológicos, resultando una mezcla de materia orgánica e inorgánica que se encuentra suspendida o disuelta, que puede llegar a deteriorar el recurso o fuentes hídricas sin un tratamiento previo a su descarga [28, 29].

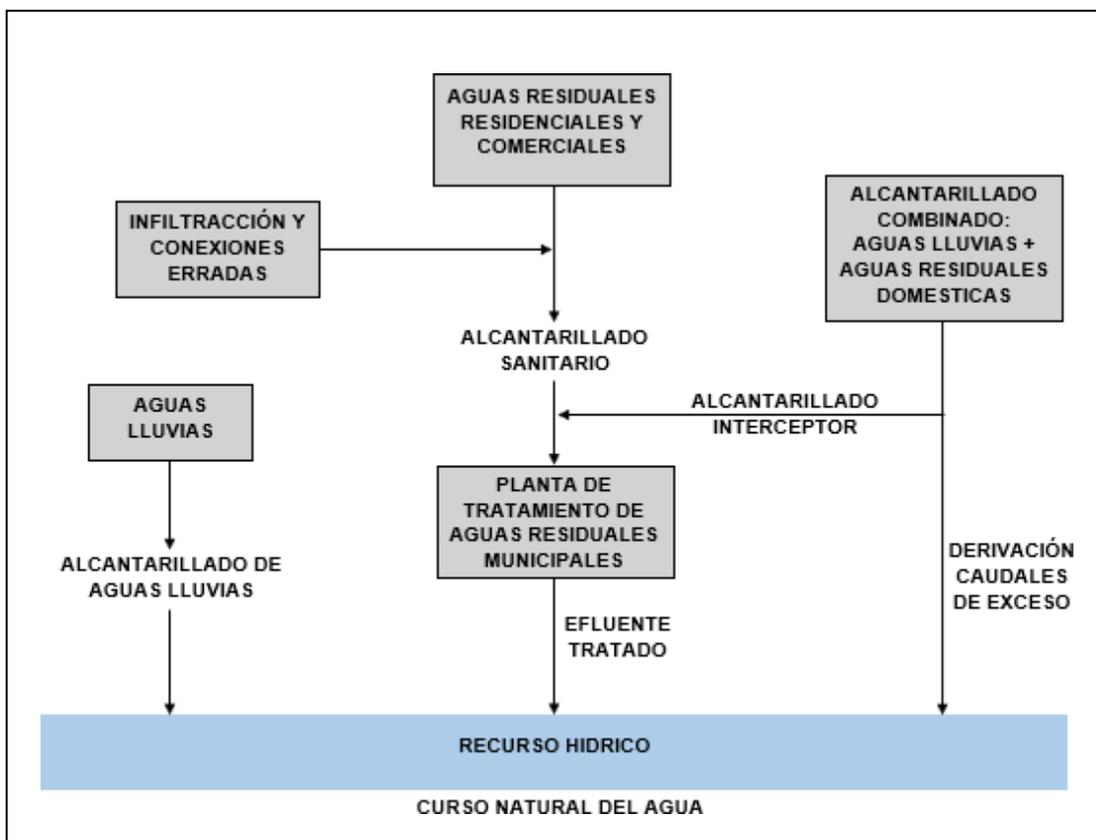
Comúnmente las aguas residuales domésticas son conducidas a través de un sistema de alcantarillado a plantas de tratamiento para su respectiva purificación previo a su descarga a fuentes hídricas, sin embargo, los hogares que no cuentan con un acceso a un sistema de alcantarillado centralizado utilizan tratamiento en el mismo lugar, como es el caso de los taques sépticos, en otros casos, o son vertidas

directamente a las fuentes hídricas sin algún control o pretratamiento. A partir de los tratamientos de aguas residuales domésticas, se busca remover la carga contaminante de modo que se cumplan los valores permisibles de los parámetros establecidos por la normatividad nacional [28, 30].

En la **figura 13**, se observa la fuente de las aguas residuales domésticas proveniente de los hogares, las cuales pueden o no estar conectados a un alcantarillado sanitario directamente o mediante un interceptor para llegar a la planta de tratamiento o verterse directamente sobre los ríos [27].

**Figura 13.**

*Principales fuentes de aguas residuales.*



**Nota.** Vertimiento de las aguas residuales a recursos hídricos por medio de diferentes fuentes. Tomado de: J. A. Romero. *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y principios de diseño*. 3ª ed. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2004.

### 2.3.1. Composición del Agua Residual Doméstica

El agua residual doméstica, como se mencionó anteriormente, es la unión de los efluentes de las cocinas, baños, lavaderos y los residuos de la cocina, lavaplatos, lavadores, entre otros originados de los hogares, a causa de esto, este tipo de agua, contienen una alta carga contaminante.

Los componentes típicos del agua residual doméstica son los excrementos humanos, los cuales están cargados de microorganismos patógenos, nutrientes, materia orgánica y contaminantes emergentes (residuos de los productos farmacéuticos), es decir, que el agua residual contiene materia tanto orgánica como inorgánica como consecuencia del uso de medicamentos, jabón, detergentes y otros productos en los hogares, además del excremento humano, orina y residuos de alimentos, de este modo, puede realizarse una cuantificación de los componentes físicos, químicos y biológicos presentes en el agua residual [32, 33].

**Tabla 7.**

*Componentes Físicos, Químicos y Microbiológicos del agua residual doméstica.*

<b>Componentes</b>	<b>Clase</b>
<b>Físicos</b>	Sólidos Temperatura Color Olor
<b>Químicos</b>	<b>Orgánicos:</b> Proteínas, Carbohidratos, Aceites y Grasas, Tensoactivos <b>Inorgánicos:</b> pH, Cloruros, Alcalinidad, Nitrógeno, Fósforo, Metales Pesados <b>Gases:</b> Oxígeno, Sulfuro de hidrógeno, Metano.
<b>Biológicos</b>	Bacterias Virus

**Nota.** Tipos de contaminantes en un vertimiento de agua residual. Tomado de: E. R. Márquez, "Alternativas de recolección y tratamiento de aguas residuales domésticas para pequeñas comunidades en el departamento de sucre," Trabajo de grado, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Sucre, 2008.

En la **tabla 7**, se ilustra los componentes del agua residual doméstica, los cuales se explican a continuación.

**2.3.1.i** Composición Física – Química. La composición física y química del agua residual doméstica es variable debido a la concentración de contaminantes presente en ella, además los factores como las condiciones locales, hora del día, día de la semana y el mes del año afectan directamente su composición. Adicionalmente, la composición o apariencia del agua residual proveniente del hogar puede variar, ya que los componentes dentro de ella pueden quedar en suspensión, disolverse o tener una naturaleza coloidal [32].

Existen diferentes características físicas y químicas como:

- Olor: El olor de las aguas residuales puede ser desagradable o muy ofensivo; esto depende de su clasificación: siendo característico de las aguas residuales fresca el tener un olor desagradable y para las aguas residuales sépticas un olor muy ofensivo, producto de la descomposición anaerobias de los compuestos sulfato o sulfuros presentes en el agua. Otros compuestos que producen los olores ofensivos característicos de las aguas residuales son las aminas, amoníaco, diaminas y sulfatos orgánicos [27].
- Color: El color del agua residual doméstica fresca comúnmente es gris, pero a medida que transcurre el tiempo adquiere un color gris oscuro hasta alcanzar una tonalidad negra, esto ocurre como consecuencia de los sólidos presentes en el agua residual que le otorgan un color característico [27, 34].
- Sólidos: La cantidad de sólidos presentes en el agua residual doméstica influye de manera directa en la cantidad de lodo que puede llegar a producirse en un sistema de tratamiento [27].

Los sólidos totales pueden estar suspendidos y disueltos.

- Sólidos totales: Son todos los sólidos que existen en las aguas residuales con un promedio de 50% de compuestos orgánicos, también son definidos como la unidad orgánica de sólidos que existen en las aguas. Es el resultado

que se genera después de evaporar el agua residual a una temperatura en el rango de 103 a 105 °C [27, 33, 34].

- **Sólidos Suspendidos:** Son los sólidos que se pueden ver a simple vista por que flotan sobre las aguas residuales, como lo son las partes de alimentos de origen vegetal, animal o basura. Estos pueden ser removidos por filtración o sedimentación. Entre los más comunes encontramos arcillas, solidos fecales, restos de papel, partículas de comida y basura. Los sólidos suspendidos presentan un tamaño superior a 1,2  $\mu\text{m}$  [27, 33].
- **Sólidos Disueltos:** Los sólidos disueltos son los componentes solubles y coloidal dentro del agua residual, son los que, a diferencia de los sólidos en suspensión, no se pueden separar por métodos de separación físicos. Estos en su mayoría son sales residuales, las cuales se pueden cuantificar por medio de la medición de la conductividad del agua. Los sólidos disueltos tienen un tamaño inferior de 1,2  $\mu\text{m}$  y pueden removerse por medio de oxidación biológica, coagulación y sedimentación [27, 33].
- **Aceites y Grasas:** El contenido de grasas y aceites son compuestos de carbono, hidrógeno y oxígeno, las cuales comúnmente se encuentran flotando en la superficie del agua residual y se caracterizan por ser solubles en hexano. Los aceites y grasas pueden ser de origen vegetal y animal son biodegradables y pueden tratarse por medio de tratamientos biológicos, mientras que las de origen mineral, no son biodegradables y requiere de pretratamientos antes de ingresar a los tratamientos biológicos, sin embargo, no pueden llegar a diferenciarse, solamente mediante su polaridad. Estos compuestos pueden producir muchos problemas, tanto en las alcantarillas como en las plantas de tratamiento. Si la grasa no se elimina antes del vertido de agua residual, puede interferir con la vida biológica en las aguas y crear películas y materias en flotación imperceptibles [27].

- Oxígeno: La materia orgánica, definida como los compuestos de estructura química diferente, son capaces de reaccionar con el oxígeno en su proceso de oxidación, factor importante ya que si no hay la cantidad suficiente de oxígeno se limita la capacidad de auto purificación del agua [14,27].
- Oxígeno Disuelto (OD): La cantidad presente de oxígeno disuelto es aportado por un intercambio con la atmosfera y por la acción fotosintética dentro del agua; este compuesto es consumido por acción de microorganismos que se desarrollan en el agua en los procesos de oxidación de la materia tanto orgánica como inorgánica; en tratamiento de agua residual es un factor importante para el diseño y operación en un sistema de tratamiento de agua residual domestico [14, 27].
- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO): La demanda bioquímica de oxígeno es la capacidad de la materia orgánica de consumir oxígeno en un cuerpo de agua, se utiliza para medir el oxígeno equivalente a la materia orgánica oxidable químicamente mediante un agente químico oxidante fuerte, por lo general dicromato de potasio. La demanda bioquímica de oxígeno es un parámetro usado para medir la calidad del agua residual determinando la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para oxidar la materia orgánica biodegradable en condiciones aerobias. De este modo, este parámetro permite determinar la cantidad de oxígeno necesario para estabilizar biológicamente la materia orgánica del agua, permitiendo evaluar la eficiencia de los procesos de tratamiento para el vertimiento de agua y a su vez, fijar las cargas orgánicas permisibles en las fuentes receptoras [14, 27].
- Demanda Química de Oxígeno (DQO): Es la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para oxidar la materia orgánica biodegradable en condiciones aeróbicas. Es el parámetro más usado para

medir la calidad de aguas residuales y superficiales, para diseñar unidades de tratamiento biológico [14, 27].

**2.3.1.ii** Composición biológica. La composición biológica en el agua residual doméstica es de vital importancia debido a la naturaleza de los microorganismos generando que sea inestable, biodegradable y putrescible, comúnmente dentro del agua residual predominan las bacterias, protozoos y virus. Las bacterias son los microorganismos más numerosos (10<sup>5</sup> por mililitro) dentro del agua, son las encargadas de la degradación de los compuestos o materia orgánica, sin embargo, debido a que es difícil la identificación de la totalidad de bacterias, se mide la presencia de Coliformes. Por otro lado, los protozoos son los encargados de la purificación de agua ya que se alimentan de las bacterias permitiendo lograr un balance natural [27, 31, 33].

- Coliformes: Son organismos patógenos que existe en las aguas residuales, generalmente son difíciles de identificar. Se caracterizan por ser bacterias gran-negativas, aerobios y facultativos anaerobios como por ejemplo *Coliaerogenes*, *Aerobacter* y *Escherichia*. Los coliformes son indicadores de contaminación del agua residual que comprueba la existencia de organismos capaces de producir enfermedades, ya que en las aguas residuales existen la presencia de estos organismos debido a que el hombre diariamente, en sus heces fecales, expulsa entre 10<sup>9</sup> y 4X10<sup>11</sup> coliformes, llegando a los cuerpos de agua debido a la descarga de los retretes [27].

**2.3.1.iii** Composición de un Agua Residual Doméstica no tratada. La composición del agua residual doméstica no tratada es determinada por los factores químicos, físicos y biológicos presentes en ella, lo cual puede variar en las diferentes fuentes bibliográficas, ya que depende del factor tiempo, abastecimiento y calidad del agua. Para ello, se realizó diferentes búsquedas bibliográficas teniendo en cuenta que abarcara aguas domésticas de la base de datos de las universidades de los departamentos de Colombia y del libro de Jairo Romero, tratamiento de aguas residuales.

A partir de la **tabla 8** y la **tabla 9**, se estima los diferentes parámetros establecidos por los autores para la caracterización del agua residual doméstica.

**Tabla 8.**

*Composición del Agua Residual Doméstica no tratada 1*

Autor	Romero		
Referencia	[27]		
Parámetros	Carga Promedio ARD rural	Concentración típica	Concentración típica
SST	25 – 30 g/ c. d	200 mg/L	220 mg/L
DBO	75 – 80 g/ c. d	200 mg/L	220 mg/L
DQO	75 – 80 g/ c. d	400 mg/L	500 mg/L
Aceites y Grasas	-	-	100 mg/L
Coliformes Totales	10 x10 <sup>8</sup> NMP/100 mL	-	-

**Nota.** Caracterización de un vertimiento de agua residual doméstica. Tomado de: J. A. Romero. *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y principios de diseño*. 3<sup>a</sup> ed. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2004.

**Tabla 9.**

*Composición del Agua Residual Doméstica no tratada 2*

Autores	Zambrano	Márquez	Torres y Briceño
Referencia	[26]	[31]	[33]
Parámetros	Concentración	Concentración	Concentración
SST	25 – 183 mg/L	100 – 350 mg/L	Débil: 100 mg/L Media: 220 mg/L Fuerte: 350 mg/L
DBO	47 – 466 mg/L	110 – 400 mg/L	Débil: 110 mg/L Media: 220 mg/L Fuerte: 400 mg/L
DQO	100 – 700 mg/L	250 – 1000 mg/L	Débil: 250 mg/L Media: 500 mg/L Fuerte: 1000 mg/L
Aceites y Grasas	-	50 – 150 mg/L	Débil: 50 mg/L Media: 100 mg/L Fuerte: 150 mg/L
Coliformes Totales	56 – 8,03x10 <sup>7</sup> CFU/100 mL	-	Débil: 10 <sup>6</sup> – 10 <sup>7</sup> Media: 10 <sup>7</sup> – 10 <sup>8</sup> Fuerte: 10 <sup>7</sup> – 10 <sup>9</sup>

**Nota:** Caracterización de un vertimiento de agua residual doméstica. Tomado de: D. A. Zambrano, *Minimización y Prevención como estrategia para el control de la contaminación por aguas residuales municipales en la zona expansión de Cali*, Trabajo de Investigación. Facultad de Ingeniería, Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad del Valle, Santiago de Cali, 2010.

En la **tabla 8**, el autor Romero considera tres caracterizaciones para el agua residual doméstica (ARD), la primera expresa la carga promedio de cada contaminante generada por cada contribuyente al día en el área rural, mientras que para la segunda y tercera composición, expresa la concentración del agua residual doméstica típica generada por cada parámetro; para estas caracterizaciones el autor no expresa las condiciones del efluente o muestreo.

Para la **tabla 9**, la caracterización de la composición del agua residual doméstica se combina a partir de valores establecidos por los diferentes autores, los cuales igualmente, recopilaron la información por la bibliografía bajo las siguientes condiciones:

- **Zambrano**

Según la autora Zambrano, mediante su recopilación bibliográfica, muestra que la carga contaminante del agua residual doméstica es la combinación del uso que se le da al agua en los diferentes espacios de la casa, como lo es el baño, área de lavado y cocina, y la combinación o mezcla de esta agua residual genera la caracterización del vertimiento de la vivienda, la cual presenta una concentración SST, DBO, DQO y coliformes, expresados en la **tabla 9**.

Adicionalmente, la autora establece que una persona consume por día aproximadamente de 3 a 9 litros de agua proveniente del acueducto, la cual es usada para la higiene personal y del hogar, además el riego de jardines, lavado de autos, llenado y mantenimiento de piscinas y la descarga de los baños, por tal motivo, el agua de desecho contiene una alta carga orgánica. La actividad que requiere mayor uso de agua es la higiene personal, la cual se realiza por medio de la ducha, el inodoro y lavamanos [26].

- **Márquez**

El autor Márquez cita el libro: “Manual de referencia de ingeniería ambiental” del autor Roberto A. para caracterizar la composición típica del agua residual domestica no tratada, estableciendo un rango con la observación de que los valores establecidos incrementan con el valor correspondiente de abastecimiento.

- **Torres Medina Y Briceño Pinzón**

Los autores Torres y Briceño compilan los datos del autor, Felez Santafe del libro: Situación actual del estado de la depuración Biológica: Explicación de los métodos y sus fundamentos para la caracterización de aguas residuales domésticas, donde se evidencia que cada uno de los parámetros y sus respectivas concentraciones dependen del nivel de contaminación del efluente clasificando al vertimiento en débil, medio y fuerte; para este vertimiento no se especifica su procedencia y condiciones de muestreo.

**2.3.1.iv** Contaminantes, fuentes y efectos. La carga contaminante dentro del agua residual domestica puede variar debido a los factores mencionadas: disponibilidad del recurso y uso, y puede generar un efecto e impacto como se ilustra en la tabla 10.

**Tabla 10.**

*Contaminantes del Agua Residual Doméstica, fuente y efectos.*

<b>Contamínate</b>	<b>Parámetro representativo</b>	<b>Impacto</b>	<b>Efecto</b>
Sólidos Suspendidos	Sólidos Totales Suspendidos	Alto	Problemas estéticos, Depósito de lodos, Adsorción de contaminantes, Protección de patógenos.
Materia Orgánica Biodegradable	DBO	Alto	Consumo de Oxígeno, Condiciones sépticas.
Patógeno	Coliformes	Alto	Enfermedades Transmitidas por el agua

**Nota.** Efectos de los contaminantes en el recurso hídrico. Tomado de: UNESCO, “Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017: Aguas Residuales El recurso Desaprovechado” UNESCO, 2017.

**2.3.1.v** Caudales del Agua Residual Doméstica. El caudal del agua residual doméstica es un factor fundamental en el diseño de un sistema de tratamiento, por este motivo, para la caracterización del agua residual doméstica, se recopila información sobre el valor del caudal generado por una vivienda o típico del agua residual doméstica, los cuales se ilustran en la tabla 11.

**Tabla 11.**

*Caudal promedio de las Aguas Residuales Domésticas en el área rural.*

<b>Autor</b>	<b>Romero</b>	
<b>Referencia</b>	[27]	
<b>Parámetro</b>	Área Residual	Base Experimental
Caudal	150 L/c. d	400 L/c. d

**Nota.** Caudal de vertimiento de un agua residual doméstica. Tomado de: J. A. Romero. *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y principios de diseño*. 3ª ed. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2004.

## 2.4. Normatividad Colombiana de los vertimientos del Agua residual Domestica

La resolución 0631 del 2015 de Colombia establece parámetros y valores límites máximos permisibles para el vertimiento a cuerpos de aguas superficiales y al sistema de alcantarillado público como se ilustra en la **tabla 12** [25].

**Tabla 12.**

*Parámetros Normativos para el agua residual doméstica (ARD).*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
SST (mg/L)	90
DBO (mg/L)	90
DQO (mg/L)	180
Aceites y Grasas (mg/L)	20
Coliformes	-

**Nota.** Valores máximos permisibles de los parámetros de un vertimiento de agua residual domestica según la resolución colombiana. Tomado de: Resolución 0631, MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, 2015.

Mediante la comparación de los valores de los parámetros establecidos para el agua residual doméstica en la **tabla 8** y **tabla 9**, con la **tabla 12**, en donde se estiman los valores máximos permisibles como nivel de aceptación según la normatividad colombiana, se comprueba que se incumple con los valores de aceptación normales, sobrepasándolos en su mayoría como se explica a continuación en la **tabla 13**.

**Tabla 13.***Comparación de la caracterización del ARD con la normatividad*

Autores	Romero		Zambrano	Márquez	Torres y Briceño	MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE
Referencia	[27]		[26]	[31]	[33]	[25]
Parámetros	Concentración					Nivel de Aceptación
SST	200 mg/L	220 mg/L	25 – 183 mg/L	100 – 350 mg/L	Débil: 100 mg/L Media: 220 mg/L Fuerte: 350 mg/L	90 mg/L
DBO	200 mg/L	220 mg/L	47 – 466 mg/L	110 – 400 mg/L	Débil: 110 mg/L Media: 220 mg/L Fuerte: 400 mg/L	90 mg/L
DQO	400 mg/L	500 mg/L	100 – 700 mg/L	250 – 1000 mg/L	Débil: 250 mg/L Media: 500 mg/L Fuerte: 1000 mg/L	180 mg/L
Aceites y Grasas	-	100 mg/L	-	50 – 150 mg/L	Débil: 50 mg/L Media: 100 mg/L Fuerte: 150 mg/L	20 mg/L
Coliformes Totales	-	-	56 – 8,03x10 <sup>7</sup> CFU/100 MI	-	Débil: 10 <sup>6</sup> – 10 <sup>7</sup> Media: 10 <sup>7</sup> – 10 <sup>8</sup> Fuerte: 10 <sup>7</sup> – 10 <sup>9</sup>	-

**Nota.** Comparación de los valores del vertimiento del agua residual doméstica recopilados en la revisión bibliográfica con los establecidos por la normatividad (Resolución 0631 del 2015).

- **Romero**

Para establecer la comparación con la normatividad de los valores de los parámetros del agua residual doméstica se consideró las dos concentraciones propuestas por el autor, evidenciando que sobrepasa los límites de SST, DBO, DQO y Aceites y grasas establecidos en la resolución 0631 del 2015, lo que evidencia la necesidad de implementar un sistema de tratamiento para disminuir su impacto en el lugar del vertimiento.

- **Zambrano**

Al igual que el autor Romero, la caracterización del agua residual doméstica propuesta por Zambrano, sobrepasa los niveles de aceptación de SST, DBO y DQO establecidos en la resolución 0631 del 2015, evidenciando un vertimiento con un nivel alto en carga contaminante que puede afectar el lugar de descarga, por lo que requiere de un tratamiento previo a ser vertido.

- **Márquez, Torres y Briceño**

La caracterización del agua residual doméstica propuesta por los tres autores, establecen un rango para el agua residual, clasificándola en un vertimiento con carga contaminante débil y media, los cuales sobrepasa los límites de SST, DBO, DQO, Aceites, Grasas y Coliformes establecidos en la resolución 0631 del 2015. Adicionalmente, los dos últimos autores, establecen una tercera clasificación del agua residual, como fuerte en carga contaminante, esta última clasificación supera los valores de las demás clasificaciones, generando el vertimiento con mayor contaminación; para los tres casos es necesario la implementación de los tres tipos de tratamiento para disminuir la contaminación.

Por este motivo, es necesario realizar un tratamiento al vertimiento de las aguas residuales doméstica mediante la implementación de un sistema de tratamiento en los hogares que no están interconectados a una planta de tratamiento de agua residual y que en su mayoría descargan su vertimiento a las fuentes hídricas o al suelo, lo que puede generar problemas ambientales a largo plazo, como es el daño de los ecosistemas y la salud de ser humano.

### **3. ANTECEDENTES (ESTADO DEL ARTE)**

En el presente capítulo se describen propuestas de modelos de sistemas de tratamiento para aguas residuales domésticas de diferentes autores como resultado de la recopilación bibliográfica, comparando las unidades de operación y respectivo dimensionamiento. Para cada diseño propuesto por los diferentes autores, se considera las variables de diseño, número de habitantes en cada unidad habitacional o vivienda, además del objetivo principal del tratamiento.

La metodología aplicada para la búsqueda de información para el desarrollo del capítulo consistirá en una búsqueda categorizada mediante la selección de palabras claves, aplicando: una cobertura de sistemas de tratamiento de aguas residuales en viviendas en la zona rural, la tipología de documentos, incluye una revisión a artículos y tesis en formato digital a partir de las fuentes de información de la revista EIA y base de universidades (Universidad Católica Andrés Bello, Universidad El Bosque, Universidad abierta y a distancia).

#### **3.1. Propósito de la implementación del sistema de tratamiento individual de agua**

El vertimiento de aguas residuales no tratadas a un cuerpo de agua, como lo son los ríos y lagos, genera que el ser humano se convierta en un usuario directo o indirecto de esta agua al consumir alimentos que entran en contacto con esta, y adicional esto, al verter el agua residual cruda en las fuentes hídricas en exceso es posible afectar la capacidad de asimilación de contaminantes del agua, disminuyendo su calidad. Por estas razones, surge la necesidad de implementar sistemas de tratamiento de agua que permitan disminuir o eliminar los riesgos para la salud y minimizar los impactos ambientales [27].

El agua residual doméstica cruda es considerada putrescible, olorosa y ofensiva, por lo que representa un riesgo para la salud y el ambiente debido a la cantidad de material fecal, orina y compuestos contaminantes que se concentran en ella. La prevención de la contaminación del recurso hídrico y suelo depende de una la

selección apropiada de técnicas de tratamiento que permitan su correcta operación [27].

El diseño de un sistema de tratamiento depende de los objetivos propuestos (remoción de DBO, Sólidos Suspendidos, patógenos, sustancias orgánicas, sustancias inorgánicas disueltas, etc.), recursos económicos-técnicos, criterios de descarga y motivaciones ecológicas [27].

La importación en la implementación de cada uno de los tipos de tratamiento de agua se explica en la **tabla 14**, mostrada a continuación.

**Tabla 14.**

*Objetivo de los tipos de Tratamiento de Agua Residual*

Tratamiento	Propósito/Objetivo
Preliminar	Remoción de componentes que puedan afectar la etapa posterior de tratamiento, dificultar la operación y mantenimiento del sistema de tratamiento.
Primario	Remoción parcial de sólidos suspendidos, materia orgánica u organismos patógenos. Mediante este tratamiento se logra remover el 60% de los sólidos y el 35-40% de la DBO.
Secundario	Remoción de DBO soluble y sólidos suspendidos.
Terciario	Remoción de nutriente que promuevan la eutrofización en fuentes receptoras o mejora de la calidad del efluente.

**Nota.** Explicación del propósito de los tipos de tratamiento existentes. Tomado de: J. A. Romero. *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y principios de diseño*. 3ª ed. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2004.

La combinación de unidades de operación y proceso de un sistema radica en función de lo mencionado anteriormente, ya que para su diseño se requiere la combinación de pretratamientos, tratamientos primarios, secundarios y terciarios que remuevan la carga contaminante y genere un efluente que cumpla con la normatividad y no contamine el lugar de vertimiento.

### **3.2. Sistemas de tratamiento de agua residual domésticos propuestos**

A continuación, se ilustra las propuestas de diseño existentes de sistemas de tratamiento de agua residual doméstica para viviendas en la zona rural, las cuales consideraron los criterios de la selección para el diseño respectivo que cumpla con el propósito de remover la carga contaminante del vertimiento en cada caso.

#### **3.2.1. Antecedente 1**

En el trabajo de grado “PROPUESTA DE DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICA DE TIPO MODULAR, PARA UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR RURAL” se desarrolló la propuesta de diseño para las zonas rurales de Venezuela, específicamente para viviendas unifamiliar, con el propósito incorporar procesos biológicos para su posible reutilización para riego, que complementa operaciones típicas como lo son las fosas sépticas, las cuales comúnmente se usan en zonas rurales que no tienen acceso a un alcantarillado, sin embargo, representan un problema sanitario y poseen un serie de desventajas, ya que se inundan fácilmente y por la falta de mantenimiento, generan olores desagradables y la aparición de vectores creando un ambiente insalubre [35].

El estudio se realizó sobre una comunidad indígena de Macapaima compuesta de 65 viviendas: 10 multifamiliares y 55 unifamiliares, las viviendas unifamiliares aproximadamente se compone por 6 integrantes en promedio, los cuales destinan el uso del agua para la lavandería, cocina, limpieza e higiene personal, siendo así el origen del agua residual doméstica, con un caudal de 1200 litros por día por cada vivienda, sin embargo, para el desarrollo del diseño del sistema de tratamientos se considera la dotación de agua en total con la que cuenta una vivienda, la cual es de 1500 litros por día por vivienda [35].

El agua residual generado por la vivienda presenta la siguiente carga contaminante ilustrada en la **tabla 15**

**Tabla 15.**

*Carga contaminante del agua residual de las viviendas de la comunidad indígena de Macapaima*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	192 mg/L
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	149 mg/L
Oxígeno Disuelto (OD)	3,48 mg/L

**Nota.** Valores de la carga contaminante del agua residual de las viviendas unifamiliares de la Comunidad Macapaima. Tomado de: J. Gómez y R. Manzour, *Propuesta de diseño de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas de tipo modular, para una vivienda unifamiliar rural*, Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad Católica Andrés Bello, 2013.

Para el tratamiento del agua residual generada en la comunidad los autores proponen el uso de un tratamiento primario por medio de un tanque de dos compartimientos que funcione como un sedimentador y clarificador para el caudal de la vivienda (1500 L/día) con el siguiente dimensionamiento mostrado en la **tabla 16** [35].

**Tabla 16.**

*Dimensionamiento del tanque para el sistema de tratamiento de agua para la vivienda de la comunidad indígena de Macapaima*

<b>Especificación</b>	<b>Valor</b>
Longitud	1,90 m
Ancho	0,70 m
Altura total del tanque	1,68 m
Altura de la salida del tanque	1,10 m
Altura de la entrada al tanque	1,20 m
Altura (profundidad lodo)	0,45 m
Capacidad	1500 L

**Nota.** Especificación del dimensionamiento del tanque del sistema de tratamiento de agua residual doméstica para la comunidad indígena de Macapaima. Tomado de: J. Gómez y R. Manzour, *Propuesta de diseño de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas de tipo modular, para una vivienda unifamiliar rural*, Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad Católica Andrés Bello, 2013.

A partir del cálculo del tanque los autores compararon dos modelos para la incorporación de un tratamiento biológico: filtro percolador y lodos activados, seleccionando el primer método (filtro percolador), ya que presentó una mayor remoción de materia orgánica generando valores más bajos de DBO, mejorando la eficiencia del sistema de tratamiento. Para el filtro, se empleó un tanque cilíndrico de 200 litros por su bajo costo y presencia en las viviendas como un tanque de almacenamiento de agua [35].

Una vez se seleccionó el tanque para el filtro percolador y conociendo el área superficial del tanque y el caudal de la vivienda, se determinó la altura del medio filtrante requerida para tratar el agua residual [35].

**Tabla 17.**

*Dimensionamiento del filtro percolador para el sistema de tratamiento de agua para la vivienda de la comunidad indígena de Macapaima*

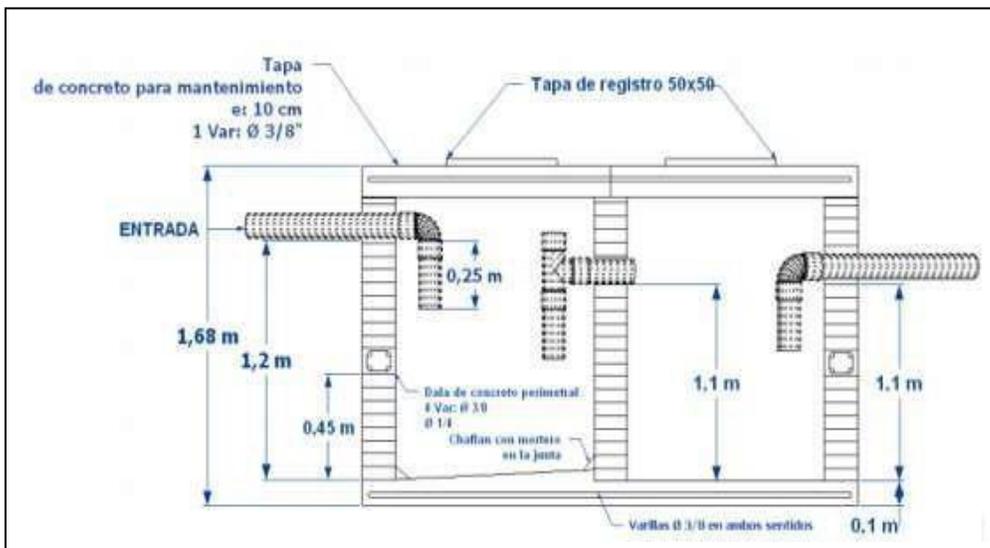
<b>Especificación</b>	<b>Valor</b>
Diámetro	0,52 m
Altura	0,85 m
Altura del medio filtrante	0,4 m
Área Superficial	0,2 m <sup>2</sup>
Capacidad	200 L

**Nota.** Especificación del dimensionamiento del filtro percolador del sistema de tratamiento de agua residual doméstica para la comunidad indígena de Macapaima. Tomado de: J. Gómez y R. Manzour, *Propuesta de diseño de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas de tipo modular, para una vivienda unifamiliar rural*, Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad Católica Andrés Bello, 2013.

A continuación, se ilustrará el plano del sistema de tratamiento propuesto por los autores al combinar los tratamientos primarios con un secundario para el tratamiento del agua residual doméstica generada por una vivienda de la comunidad indígena de Macapaima.

**Figura 14.**

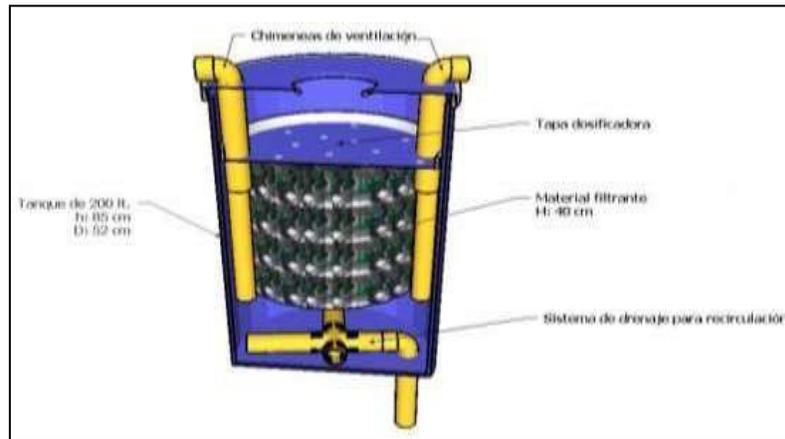
*Plano del tanque sedimentador y clarificador del sistema de tratamiento de agua residual para la comunidad indígena de Macapaima*



**Nota.** Plano con vista frontal del tanque sedimentador y clarificador. Tomado de: J. Gómez y R. Manzour, *Propuesta de diseño de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domesticas de tipo modular, para una vivienda unifamiliar rural*, Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad Católica Andrés Bello, 2013.

**Figura 15.**

*Plano del filtro percolador*



**Nota.** Plano con corte transversal del filtro percolador. Tomado de: J. Gómez y R. Manzour, *Propuesta de diseño de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domesticas de tipo modular, para una vivienda unifamiliar rural*, Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad Católica Andrés Bello, 2013.

Por medio del modelo propuesto por los autores para una casa unifamiliar, es posible alcanzar una remoción de la DBO de 78% y disminución de la carga contaminante, lo que garantiza el cumplimiento de la normatividad sanitaria para efluentes para riego, siendo así capaz de depurar de manera eficiente el agua residual y reutilizarla para riego [35].

**Figura 16.**

Vista 3D del sistema de tratamiento de agua residual domestica para la comunidad indígena Macapaima



**Nota.** Plano 3D del sistema de tratamiento de agua residual domestica para la comunidad indígena de Macapaima incorporando el tanque sedimentador, clarificador y el filtro percolador. Tomado de: J. Gómez y R. Manzour, *Propuesta de diseño de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domesticas de tipo modular, para una vivienda unifamiliar rural*, Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad Católica Andrés Bello, 2013.

### **3.2.2. Antecedente 2**

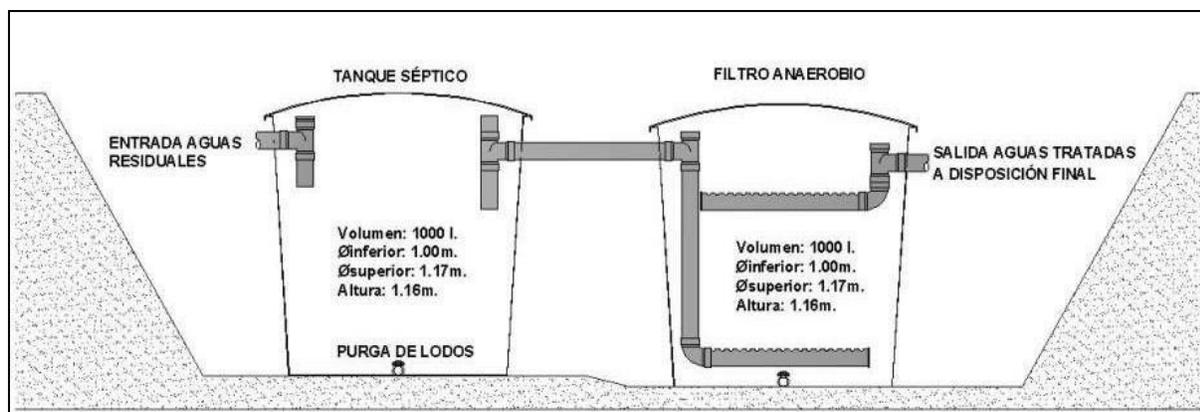
En el artículo “PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA EVALUACIÓN DE SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS EN EL SITIO DE ORIGEN” los autores evalúan un sistema de tratamiento de agua residual doméstica en el sitio de origen de una vivienda para determinar su desempeño mediante la incorporación de unidades de muestreo (tanque de almacenamiento) para su respectivo control, logrando obtener una muestra representativa del agua residual y el agua tratada. Para ello, se propone una evaluación técnica a partir del seguimiento a las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua con el propósito de determinar comportamiento del vertimiento a través del sistema mediante los dos tanques de almacenamiento en la entrada y la salida [36].

La descarga de agua residual doméstica generada a partir de un sistema de tratamiento en su lugar de origen ha sido un tema de preocupación para las autoridades ambientales, resultando en un desafío debido a la complejidad para el control y evaluación de la descarga genera en cada sistema debió a su uso a lo largo del planeta, por lo que resulta difícil evaluar su respectivo desempeño [36].

Por este motivo, la propuesta de diseño consiste en evaluar un sistema de tratamiento compuesto por un tanque séptico y un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) como se ilustra en la **figura 17**.

**Figura 17.**

*Sistema de tratamiento en el sitio de origen evaluado en la propuesta metodológica*



**Nota.** Sistema compuesto por dos unidades de operación, tanque séptico y filtro anaerobio de flujo ascendente. Tomado de: B. Wills. et al, “Propuesta Metodológica para la evaluación de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas en el sitio de origen,” Revista EIA, No. 13, pp. 93-105, julio 2010.

Para cada una de las unidades de operación, se cuenta con el siguiente dimensionamiento:

**Tabla 18.**

*Dimensionamiento del sistema de tratamiento de la propuesta 2*

Unidad de operación	Dimensionamiento
Tanque Séptico	Volumen: 1000 L
	Altura: 1,16 m
	Diámetro interior: 1,00 m
	Diámetro exterior: 1,17 m
Filtro Anaerobio	Volumen: 1000 L
	Altura: 1,16 m
	Diámetro interior: 1,00 m
	Diámetro exterior: 1,17 m

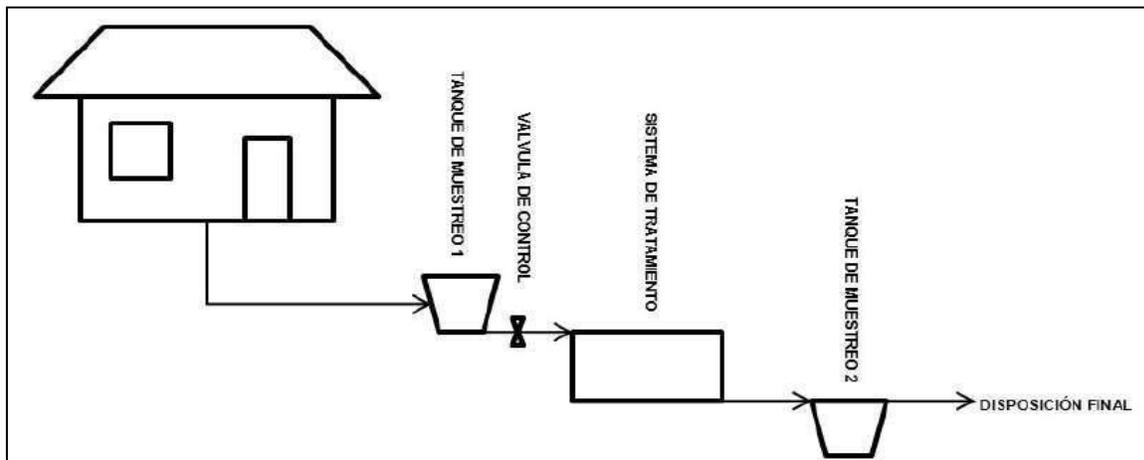
**Nota.** Dimensionamiento del tanque séptico y filtro anaerobio de flujo ascendente del Sistema de Tratamiento. Tomado de: B. Wills. et al, “Propuesta Metodológica para la evaluación de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas en el sitio de origen,” Revista EIA, No. 13, pp. 93-105, julio 2010.

Para su evaluación los autores proponen implementar dos tanques de almacenamiento, que cumplan la función de acumulación y homogenización, además de ser aforado para determinar con exactitud el volumen. Para los dos tanques de almacenamiento propuesto para el monitoreo requieren las siguientes restricciones: el primer tanque, se instalará al inicio del sistema de tratamiento de modo que el agua residual entre por la parte superior y salga por la parte inferior por acción de una válvula de control de salida, para el segundo tanque, se instalará al final del sistema de tratamiento, y el agua tratada entrará y saldrá por la parte superior. El diseño de ambos tanques se realizará a partir del volumen superior de acuerdo con el caudal máximo [36].

A continuación, se muestra el esquema de la representación visual del lugar de instalación de los tanques de almacenamiento para el muestreo del agua residual doméstica generada por una vivienda.

**Figura 18.**

*Representación del método de evaluación técnica*



**Nota.** Lugar de instalación de los tanques de almacenamiento para el respectivo muestreo del agua residual doméstica generada que permitirán el control y evaluación técnica del sistema de tratamiento. Tomado de: B. Wills. et al, "Propuesta Metodológica para la evaluación de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas en el sitio de origen," Revista EIA, No. 13, pp. 93-105, julio 2010.

Los autores realizaron la evaluación técnica del sistema de tratamiento durante cuatro días considerando las variaciones en las actividades diarias que afectan la composición del agua residual doméstica en una vivienda compuesta por cinco miembros en el municipio de Envigado. Se determinó un consumo de agua per cápita de 148,4 Litro/habitante/día y que el caudal máximo es de 300 Litros/hora, con un 85,3% del volumen generado en un periodo de 8 horas y el restante en 10 horas [36].

La evaluación de la remoción de carga orgánica del agua residual doméstica generada por medio del sistema se muestra en la **tabla 19**.

**Tabla 19.**

*Evaluación de la remoción de SST y DQO*

Parámetro	Concentración (mg/L)		Remoción (%)
	Afluente	Efluente	
SST	671,75	282,75	57
DQO	411,25	43,00	89

**Nota.** Lugar de instalación de los tanques de almacenamiento para el respectivo muestreo del agua residual doméstica generada que permitirán el control y evaluación técnica del sistema de tratamiento. Tomado de: B. Wills. et al, “Propuesta Metodológica para la evaluación de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas en el sitio de origen,” Revista EIA, No. 13, pp. 93-105, julio 2010.

Los autores analizan que la remoción de la carga orgánica es inferior comparada con la remoción de los sólidos suspendidos debido a la influencia que la temperatura que generan una mayor predominancia en los procesos físicos sobre los biológicos, ya que la temperatura reportada, 12 -18 °C, evidencia que se encuentra en el intervalo psicrófilo, por lo que no se favorece el crecimiento de las bacterias encargadas de la degradación de la materia orgánica. De acuerdo con el propósito de los autores, al implementar estos dos tanques, se permite evaluar a evolución del agua residual a través de las unidades de tratamiento, logrando evaluar el desempeño, como fue el caso del análisis en la unidad de tratamiento biológico [36].

### **3.2.3. Antecedente 3**

En Colombia, las viviendas de las zonas rurales que no tienen un sistema de abastecimiento de agua recurren a conexiones ilegales a la red pública o toman el agua directamente de los ríos, lagos o pozos profundos que no aseguran la calidad del agua generando un riesgo para su salud. Adicionalmente, en muchos casos las zonas rurales no tienen sistemas de tratamiento para el agua residual vertida, lo cual afecta a los sistemas naturales, asegurando que alrededor del 90% del agua vertida a los ríos no recibe un sistema de depuración, siendo para el caso de Colombia, una representación de la tercera parte de los hogares rurales, lo que implica que no tengan soluciones adecuadas para el saneamiento [37].

En el trabajo de grado “Diseño de un sistema de tratamiento y reutilización de aguas grises producidas en la finca “El Porvenir 2” El Espinal – Tolima” los autores proponen tratar el agua gris generado en la finca, compuesta por el agua que llega de los lavamanos, ducha, lavaplatos y lavadero de la vivienda, excluyendo el agua proveniente de la descarga de las cisternas, por lo que su composición es baja para microorganismos patógenos, es decir, que presenta un bajo porcentaje de contenido orgánico y de coliformes, de esta manera son más fáciles de tratar para llegar a ser reutilizada en la descarga de inodoros, lavado de pisos, automóviles y para el riego de jardines [37].

El lugar de estudio (Finca El Porvenir 2) no cuenta con un acueducto para el abastecimiento de agua, recurriendo a camiones que transporta agua de las zonas urbanas, adicionalmente para los vertimientos generados, la finca separa los dos vertimientos, el agua negra llega a un pozo de absorción y el agua gris, se vierte directamente en una fuente hídrica superficial cercana a la finca, alterando la composición física y biológica de la quebrada, ya que este tipo de agua contiene tensoactivos de los detergentes disminuyendo la solubilidad del oxígeno disuelto, afectando la oxidación de la materia orgánica e inhibiendo los proceso de fotosíntesis, generando la muerte de la flora y fauna acuática [37].

El caudal del vertimiento del agua residual generado por la finca es de 0,87 litro por segundo y su composición se muestra en la **tabla 20**, valores que son importantes para el dimensionamiento del sistema de tratamiento y para evaluar la eficiencia de remoción de contaminantes [37].

**Tabla 20.**

*Composición del agua residual (agua gris) generado en la finca "El Porvenir 2".*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	14 mg/L
Aceites y Grasas	32 mg/L
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	322,7 mg/L O <sub>2</sub>
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	18,7 mg/L O <sub>2</sub>
Recuento <i>E. Coli</i> Fecal	3x10 <sup>7</sup> UFC/100 mL
Recuento <i>E. Coli</i> Total	2x10 <sup>5</sup> UFC/100 mL

**Nota.** Valores de la carga contaminante del agua residual (agua gris) de la finca “El Porvenir 2”. Tomado de: P. Moncaleano y M. Ramírez, *Diseño de un sistema de tratamiento y reutilización de aguas grises producidas en la finca “El Porvenir 2” El Espinal – Tolima*, Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad El Bosque, 2019.

Los autores a partir de criterios de selección y una matriz de comparación, eligen un sistema de tratamiento compuesto por una trampa de grasa, humedal superficial de flujo horizontal (HFSS) y un filtro de carbón activado granular (GCA) para la finca “El Porvenir 2” con un promedio de 4 habitantes adultos y 2 menores de edad, para un total de 6 habitante, con el dimensionamiento establecido en la **tabla 21** considerando una remoción teórica para el humedal de 90% SST, 89% DQO, 87% DBO, 88% coliformes fecales y para el filtro del 97-98% de DBO, 99% de surfactantes, 99% de coliformes fecales [37].

**Tabla 21.**

*Dimensionamiento de las unidades de operación para el sistema de tratamiento propuesto para la finca "El Porvenir 2".*

<b>UNIDAD DE OPERACIÓN</b>	<b>DIMENSIONAMIENTO</b>
Trampa de Grasa	Volumen: 0,03 m <sup>3</sup> Área: 0,06 m <sup>2</sup> Alto: 0,45 m Largo: 0,30 m Ancho: 0,30 m
Humedal Superficial de Flujo Horizontal	Volumen: 7,90 m <sup>3</sup> Área superficial: 13,20 m <sup>2</sup> Área transversal: 2,60 m <sup>2</sup> Alto: 0,70 m Largo: 3,00 m Ancho: 4,50 m
Filtro de Carbón Activado Granular	Volumen: 1,8 m <sup>3</sup> Alto: 0,60 m Largo: 1,00 m Ancho: 3,00 m Profundidad del medio (carbón activado): 0,60 m

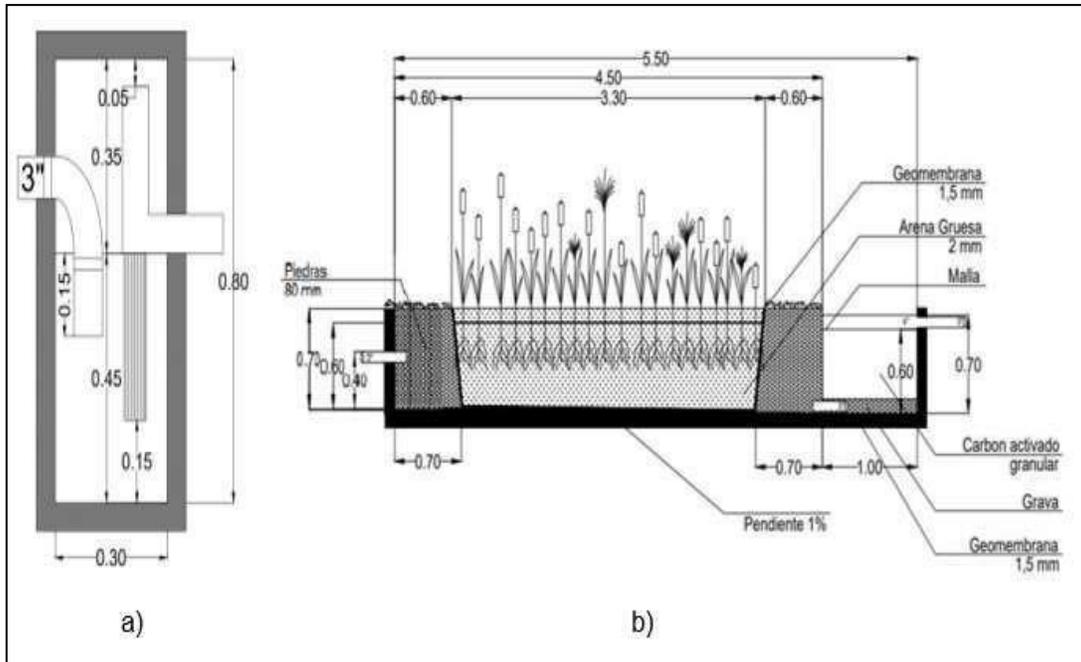
**Nota.** Dimensionamiento de la trampa de grasa, humedal y filtro para el tratamiento de aguas grises en la finca "El Porvenir 2". Tomado de: P. Moncaleano y M. Ramírez, *Diseño de un sistema de tratamiento y reutilización de aguas grises producidas en la finca "El Porvenir 2" El Espinal – Tolima*, Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad El Bosque, 2019.

Para el humedal, los autores seleccionaron la planta *Scirpus Californicus*, también conocido como "juncos" por ser la más usada en los humedales de flujo superficial con la capacidad de crecer en el agua con una profundidad de 5 cm a 3 m. Adicionalmente, se decide implementar un filtro para disminuir el valor de la DQO al depurar los agentes tensoactivos del agua [37].

En la **figura 19** se muestra el plano con vista de corte para la trampa de grasas, el humedal y el filtro y en la **figura 20**, la respectiva ubicación en los terrenos de la finca "El Porvenir 2" considerando un espacio para un tanque de recolección con el fin de poder reutilizar el agua tratada [37].

**Figura 19.**

*Plano con vista de corte con el dimensionamiento de la trampa de grasa, el humedal y el filtro para la finca "El Porvenir 2"*



**Nota.** Plano con vista en corte con el dimensionamiento de: a) la trampa de grasa y b) humedal y filtro para el tratamiento de aguas grises en la finca "El Porvenir 2". Tomado de: P. Moncaleano y M. Ramírez, *Diseño de un sistema de tratamiento y reutilización de aguas grises producidas en la finca "El Porvenir 2" El Espinal – Tolima*, Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad El Bosque, 2019.

**Figura 20.**

*Ubicación del modelo del sistema de tratamiento en la finca "El Porvenir 2".*



**Nota.** Distribución del modelo del sistema de tratamiento de aguas grises en la finca “El Porvenir 2” Tomado de: P. Moncaleano y M. Ramírez, *Diseño de un sistema de tratamiento y reutilización de aguas grises producidas en la finca “El Porvenir 2” El Espinal – Tolima*, Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad El Bosque, 2019.

Para el diseño propuesto por los autores, se consideró el sistema de tratamiento más conveniente ajustándose a las necesidades de la familia que habita en la finca, teniendo en cuenta los criterios de: disminución de olores y vectores, bajo costo de construcción y mantenimiento, adecuado paisaje y facilidad de operar en el clima del lugar, de esta manera el agua tratada y recolectada en el tanque al final del sistema de tratamiento, pueda reutilizarse en actividades no potables [37].

#### **3.2.4. Antecedente 4**

En el trabajo de grado “Tratamiento de aguas residuales aplicación de humedales artificiales” el autor propone la construcción de un humedal superficial para un lote compuesto por dos viviendas (Manzana 36 ex Finca La Venta) del pueblo San Miguel Ajusco de la delegación de Tlalpan de ciudad de México, lugar que no cuenta con un servicio de alcantarillado o drenaje, lugar en el que habitan 2 persona en la primera vivienda y 4 personas en la segunda vivienda, para un total de 6 personas [38].

En la propuesta de diseño, el autor contemplo el consumo de agua potable mensual ( $0,17 \text{ m}^3/\text{día}$  por habitante), además de la temperatura de la localidad, la cantidad de agua lluvia, área disponible y costumbre de los habitantes para la construcción y mantenimiento del humedal. Para los parámetros de diseño, determino la entrada y salida de materia orgánica, la temperatura en el humedal, profundidad, pendiente, porosidad, conductividad hidráulica y diámetro del sustrato (piedra de río o tezontle) para un tipo de vegetación Juncos y Carrizos [38].

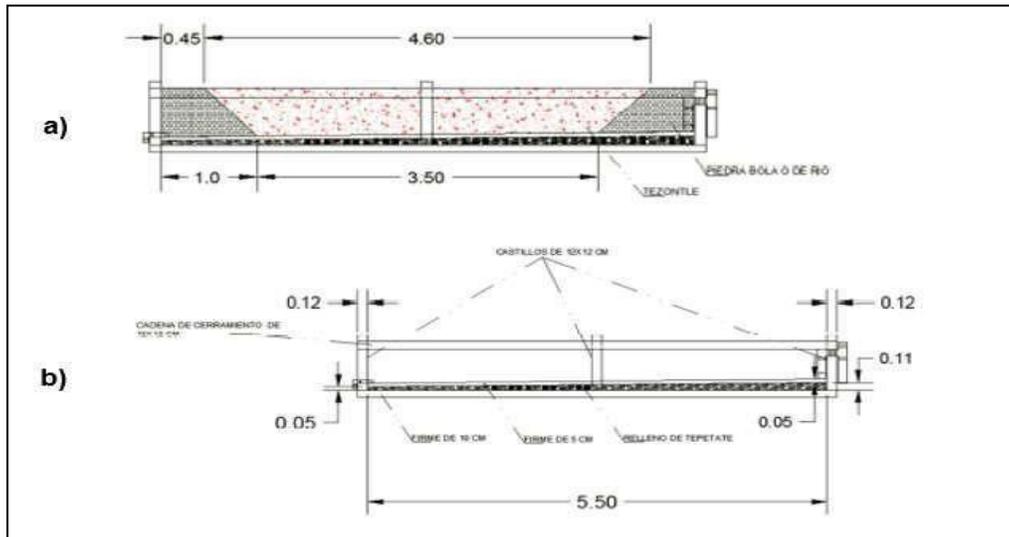
De acuerdo con lo mencionado anteriormente, se estableció un caudal de diseño de  $1,02 \text{ m}^3/\text{día}$  y un área superficial del terreno de  $21 \text{ m}^2$ , que mediante un estudio del predio el autor determino la construcción de tres humedales para el aprovechamiento del área disponible en hileras con separación de 10 y 15 cm con un largo de 5,40 m, ancho de 0,30 m, adicionalmente se contempló la recomendación de un humedal para una vivienda de 6 habitantes con un área de  $7,20 \text{ m}^2$ , largo de 12 m y ancho de 0,60 m para un tiempo de retención de 6,23 días [38].

Para el diseño el autor realiza una serie de propuestas generando un diseño final, en el cual durante el proceso de diseño se considera el tipo de humedal superficial, hábitos de consumo de agua en la vivienda y las expectativas del propietario, además de incorporación de una trampa de grasas y el control de salida del agua residual. Por ello, para la primera vivienda se aprovecha la fosa séptica existente y para la segunda casa, la construcción de un humedal cerca de las plantas existentes en el jardín para delimitar el predio, adicionalmente el agua tratada servirá con el propósito

de regar la huerta y para una cisterna prefabricada, determinando sus en la **figura 21** y el plano de la ubicación del humedal en el lote en la **figura 22** [38].

**Figura 21.**

Plano del Humedal Artificial



**Nota.** Plano con el dimensionamiento donde a) corte lateral y b) corte transversal. Tomado de: J. López, *Tratamiento de Aguas Residuales Aplicación de Humedales Artificiales*, Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F., 2015.

**Figura 22.**

*Esquema de ubicación del humedal*



**Nota.** Esquema con la ubicación de sistema de tratamiento en el lote.  
Tomado de: J. López, *Tratamiento de Aguas Residuales Aplicación de Humedales Artificiales*, Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F., 2015.

De acuerdo con el análisis del autor, aun si no se implementó por motivos de la delegación del lugar y la propietaria del predio, el humedal, a nivel teórico posee una gran adaptabilidad a cualquier localidad y es muy eficiente en la remoción de materia orgánica y requieren de cuidados de mantenimiento mínimos que incluye la supervisión de sedimentos de materia orgánica con el propósito de que no obstruya el flujo de agua, sin embargo requieren de espacios [38].

Además establece como sugerencia en el proceso de construcción, que se debe aprovechar las pendientes naturales que reduzcan costos, se debe impermeabilizar base y muros y utilizar plantas localizadas cerca al sitio y en el proceso de operación, vigilar el humedal para determinar el tipo de plantas más resistentes, realizar limpieza para retirar elementos de la rejillas, inspeccionar el estado de las paredes cada 6 meses para determinar si hay fugas o grietas y cortar las plantas con periodicidad para un correcto funcionamiento [38].

### **3.3. Comparación de los modelos propuestos por otros autores**

Mediante la búsqueda bibliográfica de sistemas de tratamiento de agua residual

doméstica aplicada a viviendas, se realiza una comparación del dimensionamiento y selección de las unidades de operación en cada una, como se muestra en la **tabla 22** y **tabla 23**.

**Tabla 22.**

*Tabla Comparativa*

Antecedente	Tipos de Tratamiento	Rendimiento (Remoción)
1	Sedimentador Calificador Filtro Percolador	78% de DBO
2	Tanque Séptico Filtro Anaerobio	57% de SST 89% de DQO
3	Trampa de grasa Humedal Superficial Filtro de Carbón Activado	Humedal: 90% de SST 89% de DQO 87% de DBO  Filtro: 97-98% de DQO 99% de Surfactantes
4	Humedal Trampa de grasa	85% (teórica)

**Nota.** Comparación entre las unidades de tratamiento y remoción de las unidades de tratamiento.

**Tabla 23.**

*Comparación de los modelos propuestos de diseño para el tratamiento de agua residual doméstica.*

Antecedente	Unidad de Operación	Dimensionamiento
1	Tanque (Sedimentador – Clarificador)	Volumen: 1500 L Altura total: 0,7 m Longitud: 1,9 m Área: 0,2 m <sup>2</sup>
	Filtro Percolador	Volumen: 200 L Altura: 0,85 m Altura medio Filtrante: 0,40 m Diámetro: 0,52 m Área Superficial: 0,20 m <sup>2</sup>
	Tanque Séptico	Volumen: 1000 L Altura: 1,16 m Diámetro interior: 1,00 m Diámetro exterior: 1,17 m

2	Filtro Anaerobio	Volumen: 1000 L Altura: 1,16 m Diámetro interior: 1,00 m Diámetro exterior: 1,17 m
3	Trampa Grasa	Volumen: 0,03 m <sup>3</sup> Área: 0,06 m <sup>2</sup> Alto: 0,45 m Largo: 0,30 m Ancho: 0,30 m
	Humedal Superficial de Flujo Horizontal	Volumen: 7,90 m <sup>3</sup> Área superficial: 13,20 m <sup>2</sup> Área transversal: 2,60 m <sup>2</sup> Alto: 0,70 m
		Largo: 3,00 m Ancho: 4,50 m
	Filtro de Carbón Activado Granular	Volumen: 1,8 m <sup>3</sup> Alto: 0,60 m Largo: 1,00 m Ancho: 3,00 m Profundidad del medio (carbón activado): 0,60 m
4	Humedal Superficial	Largo: 4,60 m Ancho: 0,60 m

**Nota.** Dimensionamiento de los diseños propuestos de los sistemas de tratamiento de agua residual domésticos.

El propósito de cada diseño propuesto es tratar el vertimiento de agua residual generado por viviendas de las áreas rurales o de ciudades pequeñas que no tienen un alcantarillado interconectado a una Planta de Tratamiento de Agua residual (PTAR), siendo vertido directamente a cuerpos hídricos o a el suelo, afectado al medioambiente debido a su carga contaminante o es su defecto, implementan sistemas de tratamiento que no aseguran en su totalidad su calidad del vertimiento o afecta el lugar de origen, al no considerar la aparición de vectores o generación de malos olores, por ello el diseño propuesto considera los requerimientos técnicos y

financieros de las viviendas.

Al comparar cada uno de los diseños propuestos se evidencia la implementación de diferentes combinaciones de tratamiento de agua residual de acuerdo con su propósito, área y presupuesto de la vivienda, por ello el dimensionamiento de sistema de tratamiento del agua residual varía.

El **diseño 1**, al estar dimensionado para una vivienda unifamiliar compuesta por 6 habitantes y presentar un caudal de 1500 L/día por cada vivienda, es el tercer diseño más grande debido al volumen de agua residual generado, de esta manera establecen en un solo tanque cumplir la función de un tanque sedimentador y clarificador, además, de implementar un filtro por encima del tanque, lo que representa una optimización del espacio, a pesar de requerir una inversión en una bomba para transportar el agua hasta el filtro.

El **diseño 2**, a diferencia de los demás diseños propuestos, establece una metodología diferente, la cual a partir de un sistema de tratamiento preestablecido (tanques sépticos y un filtro anaerobio) con un dimensionamiento fijo e igual para ambos tratamientos, implica una mayor área y volumen para la instalación de dos tanques que funcionan como unidades de muestreo para el monitoreo y control de la calidad del vertimiento, por este motivo no se contempla el número de habitantes por vivienda.

El **diseño 3**, es el sistema de tratamiento más grande debido a que aplica para una finca compuesta por dos unidades habitacionales integrada por 6 habitantes, sin embargo, a diferencia de los demás, el diseño propuesto aplica solamente para el vertimiento de agua gris generado, por lo que adicionalmente, se contempla otra unidad de operación ya instalada en la vivienda para el tratamiento de las aguas negras generadas, requiriendo así una mayor área y volumen, para la trampa de grasa, humedal y filtro de carbón activado para el agua gris y un pozo de absorción de las aguas grises.

Mediante las tres propuestas de diseño, se evidencia la combinación de sistemas de tratamientos preliminares, primarios, secundarios y terciarios de manera diferente.

con un dimensionamiento establecido para cumplir con el propósito de remover la carga contaminante del vertimiento de agua residual doméstica generada por una vivienda en la zona rural considerando la composición del efluente generado por la vivienda, el propósito de remoción, presupuesto y espacio requerido para el lugar de instalación, siendo estos factores indispensables para el dimensionamiento de un sistema de tratamiento individual.

## 4. DISEÑO DE UN SISTEMA INDIVIDUAL DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA

En el presente capítulo se describen las principales variables del diseño a considerar en el dimensionamiento del Sistema Individual de Tratamiento de Agua Residual Doméstica (SITARD), las unidades de tratamiento seleccionadas con su respectivo dimensionamiento a partir de la recopilación de las ecuaciones de diseño por medio de la bibliografía, y por último, se muestran los planos del sistema de tratamiento propuesto.

### 4.1. Variables para el diseño de un sistema de tratamiento de agua

Mediante la implementación de un Sistema Individual de Tratamiento de Agua Residual Doméstica (SITARD) se tiene como objetivo disminuir la carga contaminante para minimizar el impacto del vertimiento en el medioambiente y cumplir con los valores establecidos en la normatividad colombiana, Resolución 0631 del 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Para ello es necesario considerar las variables que pueden afectar el diseño del SITARD.

Existen dos tipos de variables, la variable dependiente y la independiente; las cuales se pueden clasificar de la siguiente manera:

- **Variable Dependiente:** La variable dependiente se considera como aquella que depende de los valores de otra variable, en este caso, para el SITARD, la variable dependiente es la **eficiencia** del sistema, puesto que para determinar la calidad del efluente es necesario considerar la remoción o disminución de la carga contaminante evaluando los parámetros o variables independientes.

**Tabla 24.**

*Variable Dependiente de Diseño*

<b>Variables</b>	
<b>Dependiente</b>	<b>Descripción</b>
Eficiencia del Sistema Individual de Tratamiento de Agua Residual Doméstica	Calidad del efluente al salir del Sistema Individual de Tratamiento de Agua Residual Doméstica.

**Nota.** Explicación de la variable dependiente del diseño para el sistema individual de tratamiento de agua residual doméstica.

- **Variable Independiente:** La variable independiente se considera como aquella que no depende de los valores de otra variable, en este caso, para el SITARD, las variables independientes son los parámetros que evalúan la calidad del efluente, siendo la DBO, DQO, SST, Coliformes, Aceites y Grasas; mediante estos parámetros se logra determinar la remoción de los compuestos contaminantes al pasar por el SITARD, lo cual se logra mediante la selección correcta de las unidades de tratamiento para el adecuado tratamiento del agua residual doméstica.

**Tabla 25.***Variables Independientes del Diseño*

<b>Variable</b>	
<b>Independiente</b>	<b>Descripción</b>
DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno)	Cantidad de oxígeno requerido por los microorganismos para la estabilización (oxidación) de la materia orgánica biodegradable.
DQO (Demanda Química de Oxígeno)	Cantidad de oxígeno requerido para oxidar químicamente la materia orgánica a partir de un agente químico.
SST (Sólidos Suspendidos Totales)	Sólidos compuestos por materia orgánica en suspensión o coloidal del agua residual que pueden ser retenidos a través de un medio filtrante.
Aceites y Grasas	Compuestos formados de carbono, hidrógeno y oxígeno que se caracteriza por flotar en el agua residual doméstica.
Coliformes	Microorganismos patógenos indicadores de contaminación en el agua, ya que son productores de enfermedades.

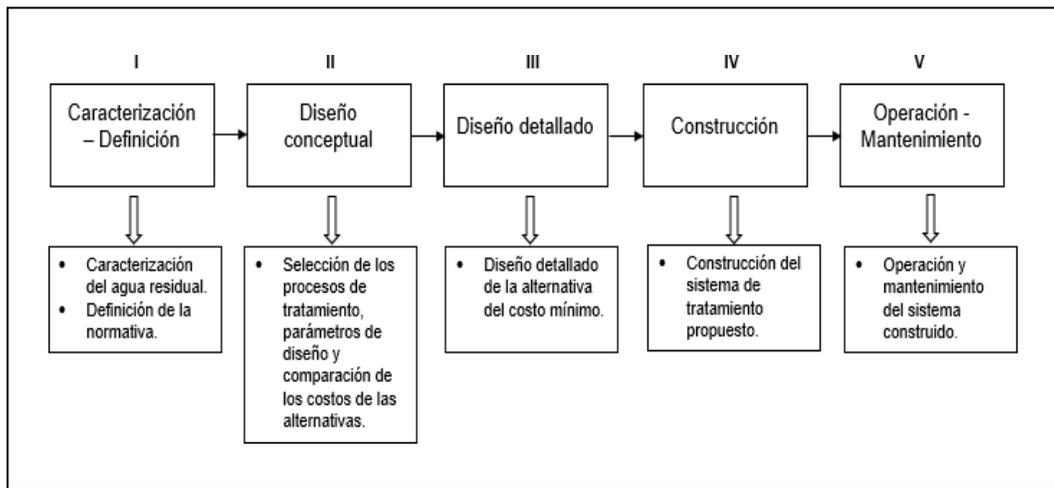
**Nota.** Explicación de la variable dependiente del diseño para el sistema individual de tratamiento de agua residual doméstica.

#### **4.2. Selección del sistema de tratamiento**

El diseño del Sistema Individual de Tratamiento de Agua Residual Doméstica (SITARD), para el presente proyecto, se sigue la metodología o paso a seguir establecidos por el autor Jairo Romero en su libro de Tratamiento de aguas residuales: teoría y principios de diseño, seleccionando tres de las cinco etapas ilustradas en la **figura 23**, las cuales son fundamentales para el diseño de la propuesta de tratamiento establecida. Las dos últimas etapas se descartan debido a la delimitación del proyecto de investigación, puesto que la propuesta no se implementará para la construcción y operación del SITARD.

**Figura 23.**

*Etapas para el desarrollo de un tratamiento de agua residual*



**Nota.** Explicación de la variable dependiente del diseño para el sistema individual de tratamiento de agua residual doméstica. Tomado de: J. A. Romero. *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y principios de diseño*. 3ª ed. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2004.

A continuación, se muestra el desarrollo de las etapas I, II y III:

#### **4.2.1. ETAPA I: Caracterización – Definición**

Para el cumplimiento de la primera etapa de diseño, en el **CAPÍTULO II** se diagnosticó la calidad del agua en Colombia en la zona rural con su respectiva caracterización, evidenciando que el vertimiento del agua residual doméstica supera los valores permitidos de la normatividad colombiana para vertimientos (Resolución 0631 del 2015), siendo un factor fundamental para el diseño del sistema, ya que resalta la importancia de implementar un sistema de tratamiento para tratar este tipo de vertimientos.

Por este motivo, a partir de la recopilación de información del **CAPÍTULO II**, se seleccionó el agua residual doméstica del área rural para comparar la composición generada en esta zona con la normatividad. En la **tabla 26**, se encuentra la caracterización del agua residual doméstica de la zona rural a partir de los valores del caudal, DBO, DQO, SST, Aceites y Grasas, y por último, coliformes.

**Tabla 26.**

Caracterización del agua residual doméstica en la zona rural

Parámetro	Valor
Caudal ARD en área rural	150 L/c. d
Caudal típico ARD	400 L/c. d
DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno)	30 – 35 g/ c. d
DQO (Demanda Química de Oxígeno)	75 – 80 g/ c. d
SST (Sólidos Suspendidos Totales)	25 – 30 g/ c. d
Aceites y Grasas	100 mg/L
Coliformes	10 <sup>8</sup> NMP/100 mL

**Nota.** Valores de los parámetros de DBO, DQO y SST de la caracterización del ARD de la zona rural expresada en L o g por contribuyente al día, expresada en la carga contaminante promedio, para aceites y grasas el valor es expresado en concentración y para los coliformes, el valor se expresa por el número más probable por 100 mL. Tomado de: J. A. Romero. *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y principios de diseño*. 3ª ed. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2004.

Considerando la tabla anterior con la caracterización, y por medio del censo nacional agropecuario del DANE en el 2014, en el cual se estable que por vivienda en la zona rural habitan en promedio 4 personas, se obtiene una caracterización del agua residual doméstica en una unidad habitacional, representada en la **tabla 27**, al aplicar la **ecuación 1** [39].

**Ecuación 1.***Concentración de carga promedio*

$$Concentracion_i = \frac{CP_i * No. de Habitantes}{Q}$$

Donde:

$CP_i =$  Carga promedio del contaminante

$Q =$  Caudal del vertimiento

$i =$  contaminante (DBO, DQO ó SST)

**Tabla 27.**

Caracterización del agua residual doméstica en una unidad habitacional.

Parámetro	Valor	Normatividad Nivel de Aceptación
Caudal ARD en área rural	600 L/d	N. A
Caudal típico ARD	1600 L/d	N. A
DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno)	200 – 233 mg/L	90 mg/L
DQO (Demanda Química de Oxígeno)	500 – 533 mg/L	180 mg/L
SST (Sólidos Suspendidos Totales)	167 – 200 mg/L	90 mg/L
Aceites y Grasas	100 mg/L	20 mg/L
Coliformes	$10^8$ NMP/100 mL	N. A

**Nota.** Se expresa el valor de los parámetros de la caracterización del agua residual doméstica de una unidad habitación compuesta por 4 personal en la zona rural y se comparan los valores de la normatividad colombiana para los vertimientos (Resolución 0631 del 2015). Cálculos de la concentración expresados en el **Anexo 1**.

Adicionalmente, en la **tabla 27** se permite comparar los valores con los establecido en la resolución 0631 del 2015, normatividad colombiana para los vertimientos, evidenciando el incumplimiento al sobrepasar los niveles de aceptación establecidos, determinando así la necesidad de implementar un Sistema de Tratamiento Individual de Agua Residual Doméstico (SITARD) para disminuir la carga contaminante del vertimiento de la unidad habitacional. De este modo, con el diagnóstico y caracterización se cumple en su totalidad el desarrollo de la etapa I para el diseño.

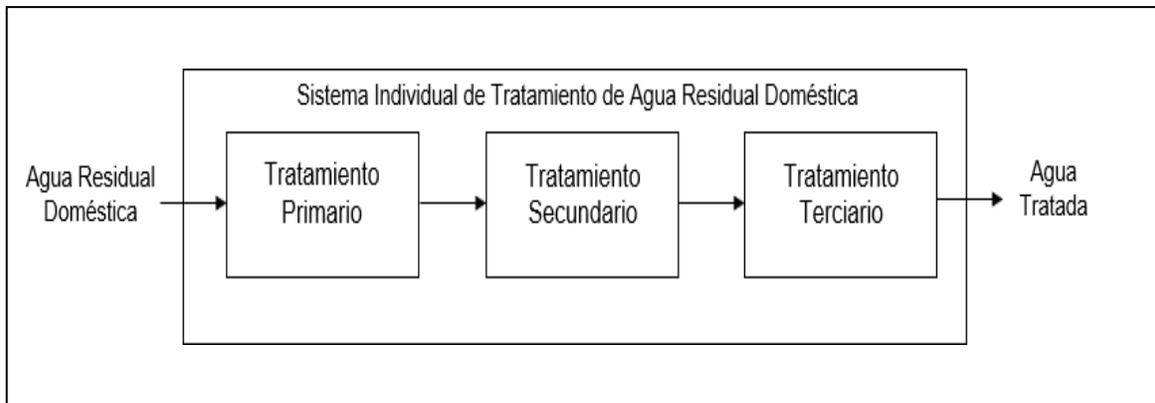
#### **4.2.2. ETAPA II: Diseño Conceptual**

Para la etapa II del diseño, se considera al Sistema Individual de Tratamiento de

Agua Residual Doméstica (SITARD) de la unidad habitacional como una unidad compacta o integra compuesta por un tren de tratamiento, como se muestra en la **figura 24**, que combina el tratamiento primario, secundario y terciario con el propósito de operar bajo tierra y a partir de la **figura 25**, se muestra el diagrama de entradas y salidas del sistema propuesto, permitiendo obtener una visualización del propósito del sistema al pasar el agua residual doméstica por el tren de tratamiento generando así, agua tratada.

**Figura 24.**

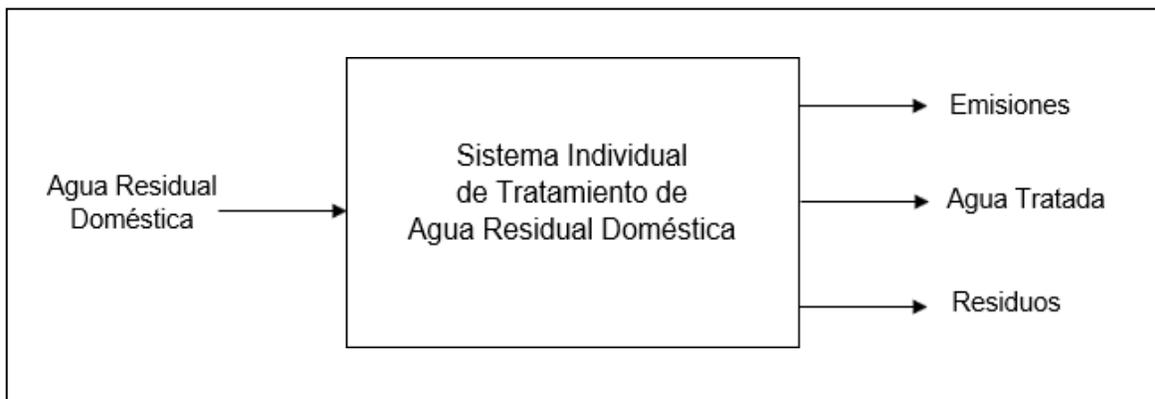
*Diagrama de un tren de tratamientos*



**Nota.** Sistema individual de tratamiento de agua residual domestica compuesta por un tratamiento primario, secundario y terciario.

**Figura 25.**

*Diagrama de entradas y salidas del sistema individual de tratamiento de agua residual doméstica*



**Nota.** Diagrama de entradas y salidas. La entrada del diagrama se compone por el agua residual domésticas y la salida, se compone por el agua tratada, las emisiones y residuos generados por el tratamiento.

La selección del proceso del SITARD depende de la combinación o configuración adecuada de las unidades de tratamiento y de los siguientes factores: Características de agua residual doméstica, calidad requerida del efluente y operación del sistema de tratamiento [27].

Por tal motivo, se evalúa los aspectos económicos, técnicos, ambientales y social para aplicar una matriz de selección que permita determinar la selección de las unidades de tratamiento más adecuadas para el SITARD.

- **Aspectos Económicos:** Implica seleccionar la unidad con menor costo, para este tipo de aspecto se considera los costos, puesto que para los sistemas de tratamiento comúnmente no se obtienen utilidades [40].
  - Costos de Capital: se incluyen los costos asociados a la construcción, equipamiento eléctrico, mecánico y terreno [40].
  - Costo de operación y mantenimiento: Se incluyen los costos asociados a la energía eléctrica, químicos y sustancias requerida en la operación repuestos y costos de mantenimiento [40].
- **Aspectos Técnicos:** Los aspectos técnicos se relacionan directamente con el lugar y ubicación del sistema de tratamiento, además de que el sistema cumpla con la normatividad y remoción [40]. Estos aspectos se mencionaron anteriormente, sin embargo, se mencionó los aspectos a considerar para el diseño.
  - Característica del afluente: determina la necesidad del pretratamiento, tratamiento primario, secundario o terciario [27].
  - Confiabilidad: probabilidad de fallas e impacto en la calidad del efluente, es decir, que las condiciones de operación no se alteren con facilidad, capacidad de operar con caudales máximos y soporte de cargas [27, 40].
  - Durabilidad: vida útil de la tecnología aplicada o unidad de tratamiento y requerimiento de repuestos mínimos [40].
  - Complejidad: ausencia del personal calificado para que la unidad de tratamiento funcione [40].
  - Factibilidad: el sistema de tratamiento debe ser factible en torno al terreno y adaptabilidad el sistema de tratamiento [27, 40].

- Aplicabilidad: El sistema debe tener el rendimiento esperado, de modo que la composición del efluente sea la requerida o establecida [27].
- **Aspectos Ambientales**: Considera los impactos ambientales que puede generar a su entorno, por ello se tiene en cuenta:
  - Potencial de recuperación de productos: potencial o capacidad de la unidad de tratamiento o tecnología para recuperar energía o nutrientes [40].
  - Potencial de reutilización del agua: potencial o capacidad de la unidad de tratamiento o tecnología de proveer un efluente con las características necesarias para poder ser reutilizado [40].
  - Energía requerida: cantidad de energía que requiere la unidad de tratamiento [40].
  - Eficiencia de remoción: eficiencia en la remoción de contaminantes que permite la unidad de tratamiento [40].
- **Aspectos Sociales**: Implica la facilidad y entendimiento de las personas a cargo de la unidad de tratamiento. Para este último aspecto, se considera la sostenibilidad social del sistema de tratamiento con relación a su interacción con la comunidad o habitantes de la unidad habitacional [40].
  - Efectos negativos: se asocian al ruido, olores ofensivos, aparición de vectores o cambios en el paisaje [40].

Una vez se establece los aspectos a considerar en la matriz de selección, se sigue metodología en función del peso de cada uno de los aspectos: Económico (20%), Técnico (40 %), Ambientales (20%) y Sociales (10%) y la determinación de los valores para una calificación que determine el grado de recomendación para implementar las unidades de tratamiento en el SITARD, la cual se muestra a continuación en la **tabla 28**.

**Tabla 28.**

*Calificación para de selección de las unidades de tratamiento del SITARD*

<b>Nivel</b>	<b>Calificación</b>
No recomendado	1
Aceptable	3
Recomendado	5

**Nota.** Se establece a partir de un nivel de calificación cualitativa una asignación numérica para establecer una calificación cuantitativa.

A partir de la suma obtenida en la calificación para cada uno de los aspectos, se establece un criterio de selección como se muestra en la **tabla 29**, considerando el grado de aplicabilidad para cada una de las alternativas de las unidades de tratamiento.

**Tabla 29.**

*Criterios de selección de las unidades de tratamiento del SITARD*

<b>Criterio</b>	<b>Rango</b>
No aplicable	12 – 24
Parcialmente aplicable	25 – 37
Aplicable	38 – 50
Totalmente Aplicable	51 – 60

**Nota.** Se establece a partir de la suma de calificación obtenida en los aspectos evaluados la aplicación de las unidades de tratamiento para el Sistema de Tratamiento de Agua Residual Doméstica (SITARD).

En primera instancia, de acuerdo con los parámetros del agua residual doméstica a analizar, en la **tabla 30**, se ilustra los procesos aplicables en el tratamiento para cada uno de ellos para su comparación.

**Tabla 30.**

*Procesos aplicables en el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas*

<b>Contaminante</b>	<b>Procesos</b>
DBO	Sedimentación, Lodos activos, Laguna Aireadas, Lagunas facultativas aireadas, Filtros Percoladores, Biodiscos, Lagunas Anaerobias, Filtros Anaerobios, Reactores Anaerobios de Flujo Ascensional (UASB), Reactor Anaerobio de Flujo en Pistón.
DQO	Sedimentación, Lodos activos, Filtros Percoladores, Biodiscos, Lagunas Anaerobias, Filtros Anaerobios, Reactores Anaerobios de Flujo Ascensional (UASB), Reactor Anaerobio de Flujo en Pistón.
SST	Sedimentación, Flotación, Cribado, Filtración, Lodos activos, Laguna Aireadas, Lagunas facultativas aireadas, Filtros Percoladores, Biodiscos, Lagunas Anaerobias, Filtros Anaerobios, Reactores Anaerobios de Flujo Ascensional (UASB), Reactor Anaerobio de Flujo en Pistón.
ACEITES Y GRASAS	Tampa de Grasas, Tanques Sépticos, Tratamientos Anaerobios.
Patógenos	Desinfección, Ultravioleta, Filtración.

**Nota.** Explicación de la variable dependiente del diseño para el sistema individual de tratamiento de agua residual doméstica. Tomado de: J. A. Romero. *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y principios de diseño*. 3ª ed. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2004.

Posteriormente, para el diseño conceptual del SITARD, se considera el rendimiento típico de la unidad de tratamiento en la remoción de contaminantes, por ello, se compara las eficiencias típicas de remoción en las diferentes unidades de tratamiento como se muestra en la **tabla 31**, considerando que la remoción, al implementar un tren de tratamiento, la remoción se efectúa en serie.

**Tabla 31.***Eficiencia típica de remoción*

Unidad de Tratamiento	Eficiencia de remoción de constituyentes (%)			
	DBO	DQO	SS	Patógenos
Desarenadores	0 – 5	0 – 5	0 – 10	Despreciable
Sedimentación Primaria	30 – 40	30 – 40	50 – 65	Despreciable
Reactores Anaerobio de Flujo Ascendente (RAFA)	65 – 80	60 – 80	60 – 70	Despreciable
Reactores Anaerobio de RAP	65 – 80	60 – 80	60 – 70	Despreciable
Filtros Anaerobios	65 – 80	60 – 80	60 – 70	Despreciable
Lagunas Anaerobias	50 – 70	-	20 – 60	Despreciable
Lagunas Facultativas	80 – 90	-	30	Despreciable
Cloración	Despreciable	Despreciable	Despreciable	100
Ultravioleta	Despreciable	Despreciable	Despreciable	100

**Nota.** Eficiencia típica de remoción de las diferentes unidades de tratamiento. Tomado de: J. A. Romero. *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y principios de diseño*. 3ª ed. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2004.

De acuerdo con la **tabla 31**, para el tratamiento primario se selecciona un sedimentador primario para remover sólidos sedimentables y material flotante con el propósito de reducir el contenido de sólidos suspendidos [27].

Para el tratamiento secundario, se descarta el tratamiento biológico aerobio debido a que el propósito del SITARD es ser una unidad compacta enterrada en la unidad habitacional de la zona rural por razones de espacio en el terreno, por este motivo, al comparar la remoción típica de cada una de las unidades de tratamiento anaerobias de la **tabla 31**, se evidencia que tienen la misma o similar eficiencia, razón por la cual se evalúa el objetivo de cada tratamiento con sus respectivas ventajas y desventajas en la **tabla 32**.

**Tabla 32.***Tratamiento secundario biológico (anaerobio)*

<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Crecimiento</b>	<b>Procesos</b>	<b>Uso Principal</b>
1. Tasa baja de síntesis celular lo que genera baja producción de lodos.	1. Requiere de temperaturas altas. 2. El medio es corrosivo.	Suspendido	1. Digestión Anaerobia 2. Aerobio de Contacto	Remoción de DBO, Estabilización
2. No requiere oxígeno por lo que usa poca energía eléctrica.	3. Exige un intervalo de pH de operación restringido. 4. Sensible a la contaminación con oxígeno.	Híbrido	1. Lagunas anaerobias 2. Manto de lodos - Reactor RAFA	Remoción de DBO y SS, Estabilización
3. Produce metano, útil como energético.	5. Puede presentar olores desagradables.	Adherido	1. Filtro Anaerobio 2. Lecho Expandido	Remoción de DBO, Estabilización
4. Tiene requerimientos nutricionales bajos.				

**Nota.** Ventajas y desventajas del tratamiento anaerobio con los tipos de crecimiento de microorganismos que pueden tener junto con los procesos y usos. Tomado de: J. A. Romero. *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y principios de diseño*. 3ª ed. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2004.

De acuerdo con los procesos o unidades de operación del tratamiento biológico anaerobio mostrado en la **tabla 32**, se evalúa las ventajas y desventajas de cada una de las tecnologías aplicadas para este tipo de tratamiento como se establece en la **tabla 33**.

**Tabla 33.***Ventajas y desventajas de tecnologías de tratamientos anaerobios*

<b>Tecnología</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Reactor de Flujo Ascendente (RAFA)	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sistema con bajo requerimiento de espacio.</li> <li>2. Bajo costo de construcción y operación.</li> <li>3. El lodo generado presenta buenas características de deshidratación.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Necesita de una etapa de postratamiento.</li> <li>2. Sensible a la presencia de compuestos tóxicos.</li> <li>3. El comienzo es un proceso lento.</li> </ol>
Filtro Anaerobio	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Resistencia a cambios de carga orgánica.</li> <li>2. Bajo consumo de energía.</li> <li>3. Bajo costo de operación.</li> <li>4. Larga vida útil.</li> <li>5. El lodo obtenido es un lodo estabilizado.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Baja reducción de patógenos y nutrientes.</li> </ol>
Tanque Séptico	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Bajo costo de construcción y operación.</li> <li>2. Mantenimiento o limpieza no frecuente.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Uso limitado a la capacidad de infiltración del terreno.</li> </ol>

**Nota.** Comparación entre las ventajas y desventajas de las tecnologías de tratamiento anaerobio. Tomado de: Y. Giraldo, Propuesta de tratamiento para el agua residual generada en la empresa soluciones nutritivas, Modalidad pasantía, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Occidente, 2020.

Para el tratamiento terciario se descarta la desinfección por el costo elevado de operación y la generación de subproductos, al igual que la filtración por membrana debió que el costo es elevado y se genera una descomposición de la membrana, por este motivo se evalúa la implementación de otro tipo de filtro para remover la turbiedad, sólidos y bacterias que no se logre remover en el tratamiento secundario, por tal motivo, al igual que en el tratamiento biológico, de comparar los diferentes materiales a partir de su ventaja y desventaja para el diseño, en la

**tabla 34** se muestra los tres tipos de materiales a considerar.

**Tabla 34.**

*Ventajas y desventajas de tecnologías de filtración*

<b>Tecnología</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
Filtro de Arena	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Remoción de sedimentos suspendidos.</li> <li>2. Remoción media de bacterias y materia orgánica.</li> <li>3. Manejo Sencillo.</li> <li>4. Costo bajo de inversión en infraestructura y de manejo.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Requiere gran superficie</li> <li>2. Costo elevado de terreno</li> <li>3. Remoción de 80% - 90% de bacteria.</li> <li>4. Remoción del 60% de materia orgánica.</li> </ol>
Filtro de tierras diatomáceas	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Remoción de turbiedad y materia orgánica</li> <li>2. Manejo sencillo.</li> <li>3. Costo bajo de inversión y de manejo.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Útiles en caso de poca turbiedad y bajo conteo de bacterias.</li> <li>2. No retiene materia orgánica.</li> </ol>
Filtro de carbón activado	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Remoción de materia orgánica y bacterias.</li> <li>2. Manejo sencillo.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Generación de residuos.</li> <li>2. Continua renovación del filtro.</li> </ol>
	<ol style="list-style-type: none"> <li>3. Costo bajo de inversión.</li> <li>4. Costo medio de mantenimiento.</li> </ol>	

**Nota.** Comparación entre las ventajas y desventajas de las tecnologías de tratamiento anaerobio. Tomado de: M. Leal, Tecnologías convencionales de tratamiento de agua y sus limitaciones. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Solar Safe Water. p. 63-72.

Al determinar el nivel de calificación y los criterios de selección, como se muestra en la **tabla 28** y **tabla 29**, se aplica la matriz de selección, obteniendo los resultados mostrados en la **tabla 35**.

**Tabla 35.**

*Matriz de selección*

Tratamiento		Primario	Secundario		Terciario		
Aspecto Unidad de Tratamiento		S	RAFA	FA	F Arena	F tierra	F Carbón
E	Costos de capital	5	3	5	5	5	5
	Costos de operación y mantenimiento	5	5	3	5	5	3
T	Confiability	5	5	5	5	5	5
	Durabilidad	5	5	5	5	5	3
	Complejidad	5	5	5	5	5	5
	Factibilidad	5	3	5	1	3	5
	Aplicabilidad	5	3	5	3	3	5
A	Potencial de recuperación de productos	1	5	5	1	1	1
	Potencial de reutilización de agua	1	3	5	5	5	5
	Energía Requerida	5	1	5	5	5	5
	Eficiencia de Remoción	5	5	5	5	5	5
So	Efectos Negativos	5	3	3	1	1	5
<b>TOTAL</b>		<b>52</b>	<b>46</b>	<b>56</b>	<b>46</b>	<b>48</b>	<b>52</b>

**Nota.** Evaluación de los aspectos aplicando el valor numérico establecido en la calificación. Donde para los aspectos las letras significan E: Económico, T: Técnico; A: Ambiental, So: Social y para las unidades de tratamiento S: Sedimentador, F Arena: filtro de Arena, F tierra: filtro de tierra, F Carbón: filtro de carbón activado. Para este caso el valor total es la suma de cada una de las calificaciones otorgadas a los aspectos.

De acuerdo con la matriz, se selecciona las unidades de tratamiento con

calificación de 50 a 60, ya que se consideran como aquellas unidades totalmente aplicables y recomendables, de este modo para el tratamiento primario aplica un sedimentador primario, con el fin de remover los sólidos suspendidos, materia orgánica o impurezas del agua residual que puedan afectar el tratamiento posterior, para el tratamiento secundario, se selecciona el filtro anaerobio, el cual reduce la materia orgánica del agua y por último, para el tratamiento terciario, se selecciona un filtro de carbono activado para eliminar en un mayor porcentaje los sólidos del agua e impurezas remanentes, generando así, la calidad del efluente que no contamine a la hora de su descarga en el recurso hídrico o suelo.

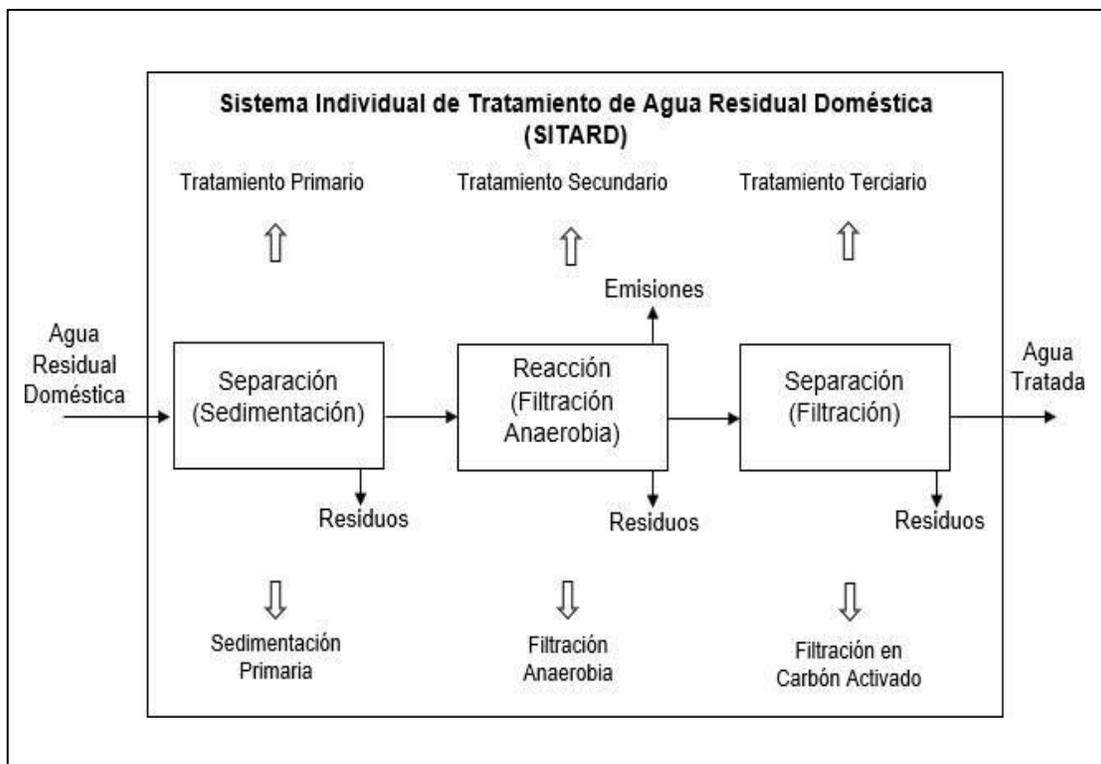
Con la selección de las unidades de tratamiento totalmente aplicables y recomendadas (sedimentador primario, filtro anaerobio y filtro de carbón activado) se da cumplimiento a la etapa II.

#### **4.2.3. ETAPA III: Diseño Detallado**

Al combinar las tres unidades de tratamiento en una unidad compacta para una unidad habitacional, se obtiene la siguiente secuencia mostrada en la **figura 26**.

**Figura 26.**

*Diagrama de bloques del Sistema Individual de Tratamiento de Agua Residual Doméstica Seleccionado*



**Nota.** Sistema de tratamiento de agua residual doméstica compuesta por un tratamiento primario (sedimentación primaria), secundario (filtración anaerobia) y terciario (filtración en carbón activado).

A continuación, se describe y dimensiona cada una de las unidades de tratamiento que compone al sistema individual:

**4.2.3.i Diseño del Sedimentador Primario:** La sedimentación primaria cumple con el propósito remover sólidos suspendidos y material flotante de las aguas residuales domésticas por medio de la diferencia de densidad, ya que las partículas con densidad superior al agua se separan y por acción de la gravedad, sedimentan y desciendan, quedando en el fondo del tanque de sedimentación, de este modo, se considera la operación como un proceso físico de separación, que permite que los sólidos suspendidos se reduzcan [43 - 47].

El tratamiento primario de sedimentación permite reducir la velocidad de las aguas residuales para que tenga lugar la sedimentación y flotación de los sólidos presentes en el agua, por lo que se puede considerar, que la desaceleración del flujo mejora la eliminación o remoción de los sólidos en suspensión. Además, por medio de la sedimentación primaria, se obtiene un efluente más claro, lo que permite preparar o proteger los procesos posteriores, ya sea biológicos, físico o químicos [47].

Para el diseño del sedimentador primario, es necesario tener en cuenta los siguientes criterios: Proveer una distribución uniforme del afluente para minimizar su velocidad, Minimizar las corrientes de salida, limitando las cargas de rebose sobre el vertedero, Proveer profundidad suficiente para almacenar lodo y permitir su espesamiento adecuado, Proveer un borde libre mayor de 30 cm, Reducir efectos del viento mediante pantallas y vertederos [27].

Los tanques de sedimentación primaria pueden ser circulares o rectangulares, para el diseño del sistema individual, se decide seleccionar un sedimentador rectangular por efectos de espacio en la unidad compacta. Para el sedimentador rectangular, el agua residual debe ingresar por una serie de aperturas cerca de la superficie del extremo de la entrada del tanque con el propósito de que el agua residual avance a lo largo del tanque a velocidad baja hasta descargar el agua en el extremo opuesto sobre un vertedero [47].

El diseño se secciona de manera rectangular debido a que es comúnmente empleado en el diseño de sistema de tratamiento de agua residual doméstica y por su utilidad cuando el terreno es costoso y es necesario optimizar el espacio [48].

▪ **Ecuaciones de diseño del Sedimentador Primario:**

Para el dimensionamiento y diseño del sedimentador primario, se tiene en cuenta las siguientes ecuaciones:

**Tabla 36.**

*Ecuaciones de diseño del Sedimentador Primario*

<b>Ecuación</b>	<b>Donde:</b>	<b>Ref.</b>
<p><b>Ecuación 2. Área del sedimentador en función de la carga superficial promedio</b></p> $A_s = \frac{Q}{CHS_{prom}}$	<p><math>A_s = \text{Área del Sedimentador (m}^2\text{)}</math>  <math>Q = \text{Caudal del Afluyente (m}^3\text{/d)}</math>  <math>CHS_{prom} = \text{Carga Superficial promedio (m/d)}</math></p>	[27]
<p><b>Ecuación 3. Área del sedimentador en función de la carga superficial pico</b></p> $A_s = \frac{Q * t_{pico}}{CHS_{pico}}$	<p><math>A_s = \text{Área del Sedimentador (m}^2\text{)}</math>  <math>Q = \text{Caudal del Afluyente (m}^3\text{/d)}</math>  <math>t_{pico} = \text{tiempo de la caudal pico (h)}</math>  <math>CHS_{pico} = \text{Carga Superficial pico (m/d)}</math></p>	[27]
<p><b>Ecuación 4. Área del sedimentador en función de su dimensión</b></p> $A_s = a_s * l_s$	<p><math>A_s = \text{Área del Sedimentador (m}^2\text{)}</math>  <math>a_s = \text{Ancho del Sedimentador (m)}</math>  <math>l_s = \text{Longitud del Sedimentador (m)}</math></p>	[47, 50]
<p><b>Ecuación 5. Volumen del sedimentador en función de su dimensión</b></p> $V_s = a_s * l_s * h_s$	<p><math>V_s = \text{Área del Sedimentador (m}^3\text{)}</math>  <math>a_s = \text{Ancho del Sedimentador (m)}</math>  <math>l_s = \text{Longitud del Sedimentador (m)}</math>  <math>h_s = \text{Altura del Sedimentador (m)}</math></p>	[47, 50]
<p><b>Ecuación 6. Tiempo de residencia hidráulica del sedimentador en función de su dimensión</b></p> $THR_s = \frac{V_s}{Q}$	<p><math>THR_s = \text{Tiempo de residencia hidráulica del Sedimentador (h)}</math>  <math>V_s = \text{Volumen del Sedimentador (m}^3\text{)}</math>  <math>Q = \text{Caudal del Afluyente (m}^3\text{/d)}</math></p>	[47]

**Nota.** Ecuaciones de diseño del sedimentador primario para determinar el área, volumen y tiempo de retención.

- Cálculo del área del sedimentador:

Para el cálculo del área del sedimentador, un factor importante es el caudal del afluente del agua residual y la carga superficial, para ello es necesario aplicar la **ecuación 2** y **ecuación 3**, aplicando los datos para el diseño establecidos en la **tabla 37**. A diferencia de la **ecuación 1**, la **ecuación 2** contempla la carga superficial pico y la hora pico, en la cual se genera el mayor caudal del agua residual doméstica; para la hora pico, de acuerdo con los antecedentes y recopilación bibliográfica en los antecedentes, se determina que en promedio la hora pico para una vivienda en el área rural es de 3 horas [35].

**Tabla 37.**

*Estándares de diseño de sedimentadores primarios*

Tipo de Tratamiento	Carga superficial (m/d)		Profundidad (m)	Carga sobre el vertedero (L/s m)	Tiempo de retención (h)
	En el Caudal promedio	En el Caudal Pico			
Primario seguido de tratamiento secundario	32 – 49	80 – 122	3 – 5	1,4 – 4,3	1,5 – 2,5
	33 – 49	81 – 122	-	< 5,8	-
	32 – 49	81 – 122	3 – 3,7	1,4 – 5,7	1,5 – 2,5

**Nota.** Valores estándar para el diseño de un sedimentador primario. Tomado de: J. A. Romero. *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y principios de diseño*. 3ª ed. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2004.

Una vez se determina el área del sedimentador, se procede a calcular el ancho y longitud del sedimentador aplicando la **ecuación 4** teniendo en cuenta lo siguiente: De acuerdo con los criterios establecidos en el RAS 2000, se considera que para la dimensión de tanques de sedimentación primaria de geometrías rectangular, se establece una relación longitud:ancho entre 1.5:1 y 15:1, con una profundidad entre 2 y 5 metros y un tiempo de retención mínimo de 1 hora [49].

- Cálculo del volumen del sedimentador

El volumen del sedimentador se calcula aplicando la **ecuación 5**, al determinar el ancho y longitud y al estimar la profundidad del sedimentar a criterio de los autores.

- Cálculo del tiempo de residencia hidráulica del sedimentador

El tiempo de retención se calcula aplicando la **ecuación 6**, sin embargo, se considera las recomendaciones del RAS 2000.

▪ **Dimensionamiento del Sedimentador Primario:**

Al aplicar las ecuaciones anteriores (**ecuaciones 2** a la **ecuación 6**) y recomendaciones para el diseño, se obtiene el siguiente dimensionamiento del sedimentador primario:

**Tabla 38.**

*Dimensionamiento del sedimentador primario*

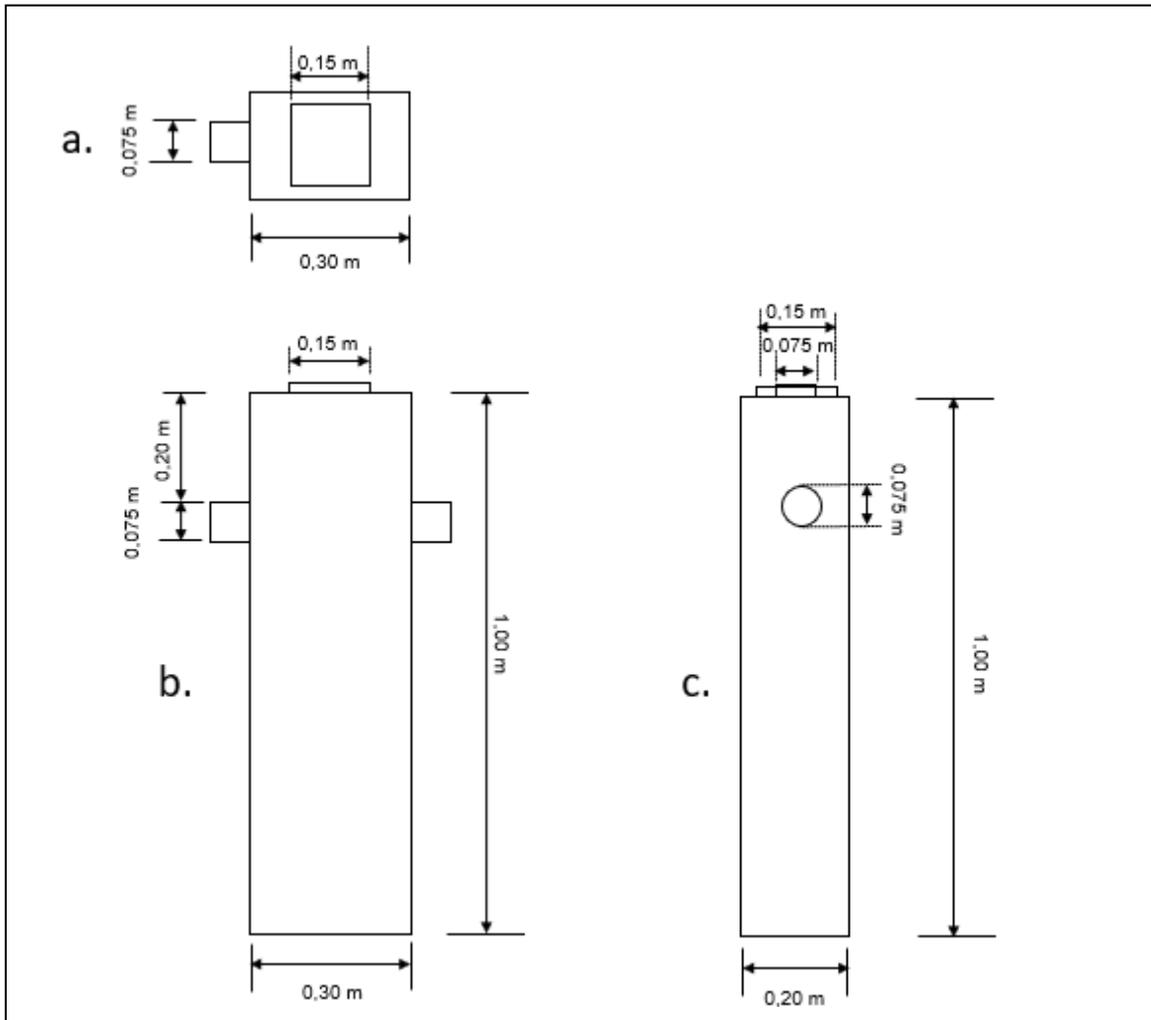
<b>Unidad de tratamiento: SEDIMENTADOR PRIMARIO</b>	
<b>Parámetros de diseño</b>	<b>Valor</b>
Caudal (m <sup>3</sup> /d)	1,6
<b>Dimensión</b>	<b>Valor</b>
Ancho (m)	0,20
Longitud (m)	0,30
Profundidad (m)	1
Área (m <sup>2</sup> )	0,06
Volumen (m <sup>3</sup> )	0,06
<b>Factor</b>	<b>Valor</b>
Tiempo de Residencia (h)	0,90

**Nota.** Dimensionamiento del sedimentador primario a partir del desarrollo de las ecuaciones de diseño (ver cálculos en el **Anexo 2**).

▪ **Plano del Sedimentador Primario:**

**Figura 27.**

*Plano del Sedimentador Primario del SITARD*



**Nota.** Plano con el dimensionamiento del Sedimentador Primario donde: **a.** Plano con vista superior, **b.** Plano con vista de Frente y **c.** Plano con vista Izquierda.

**4.2.3.ii Diseño del Filtro Anaerobio:** El filtro anaerobio es una alternativa al tratamiento de aguas residuales domésticas, que funciona como un reactor, el cual está conformado por un tanque o columna rellana con un medio sólidos que funciona como soporte del crecimiento biológico. Es uno de los métodos anaerobios más sencillos, ya que los microorganismos (biomasa), permanece como una película adherida en el tanque, y el agua residual al pasar, tiene contacto con la biomasa adherida sin posibilidad de salir junto con el agua residual [52].

Dentro de los filtros anaerobios, se encuentra el de flujo ascendente y el de flujo descendente, para el caso de una unidad compacta por facilidad en la operación, se selecciona el de flujo ascendente.

El filtro anaerobio de flujo ascendente consiste en un material filtrante compuesto por piedras, anillos plásticos o bioanillos plásticos, en el cual se forma una biopelícula fija de microorganismos sobre las superficies de los canales formados en el soporte, los cuales pueden ser de 1 a 1,25 cm con áreas específicas de 100 m<sup>2</sup>; el filtro opera con sólidos suspendidos en cantidades moderadas, adicionalmente, tiene la ventaja de remover el 94% de DQO con tiempos de retención de 1,5 días [53].

El filtro se compone de tres zonas:

- **Zona de entrada:** puede presentar dos configuraciones, con fondo falso (promueve la formación de un floc granular de buena sedimentación) y sin fondo falso (el volumen del filtro es ocupado por el medio filtrante, por lo que requiere uniformidad y alta porosidad del medio), en ambos casos, se requiere de una distribución uniforme del caudal a través de una tubería perforada evitando zonas muertas en el filtro (reactor) [52].
- **Zona empacada:** medio filtrante, en el que se presenta el crecimiento de microorganismos, es decir, es la zona en la que ocurre el desarrollo biológico, para ello se requiere de alta área superficial, adicionalmente, el medio actúa como un separador de gas – líquido – sólido y proporciona un flujo uniforme del efluente. El medio logra retener la biomasa adherida o en suspensión, lo que genera un tiempo de retención celular alto. Para este

caso puede implementarse el módulo tubular de plástico con flujo vertical [52].

- **Zona de salida:** lugar en el que llega el efluente de la zona empacada y lo evacua, garantizando la circulación correcta, puede ser a través de una tubería perforada o por un medio de un vertedero [52].

El proceso biológico en el digestor (medio filtrante) lo realiza los microorganismos metanogénicos que están retenidos en el interior del filtro (reactor), mediante la biopelícula adherida a los intersticios del soporte, que abarca el digestor y a través del cual el agua residual doméstica pasa para su depuración. La digestión anaerobia es un proceso de degradación biológica, en el que la materia orgánica del agua residual doméstica se convierte en biogás (metano y dióxido de carbono) y pequeñas trazas de nitrógeno, amoníaco, hidrogeno y ácido sulfhídrico, con una relación de 1% del volumen total del biogás; esta degradación, ocurre por la acción de bacterias en ausencia de oxígeno, en la cual el 90% de la energía disponible se convierte en biogás y el 10% se emplea para el crecimiento celular [54, 55].

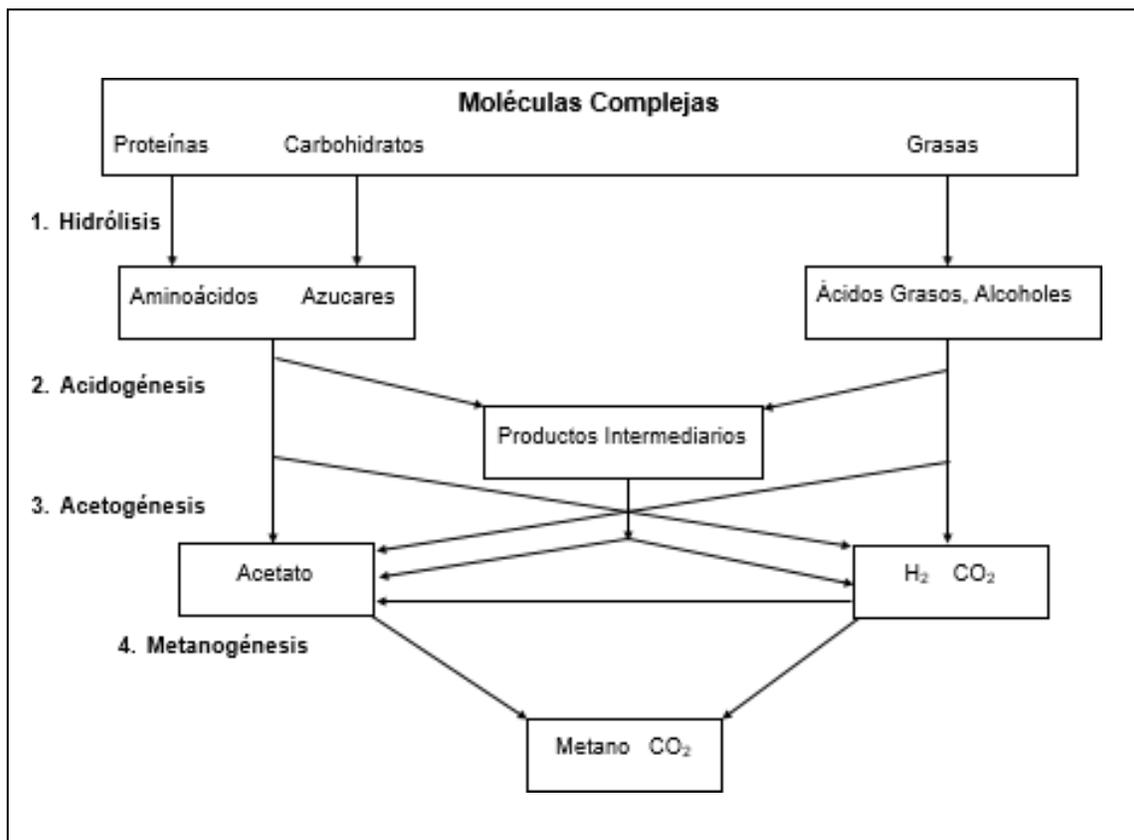
La biomasa dentro del filtro anaerobio puede encontrarse de tres maneras:

- Película adherida a la superficie del medio filtrante [55].
- Biomasa dispersa retenida en los vacíos del medio filtrante [55].
- Flóculos grandes retenidos en el fondo [55].

En el filtro anaerobio ocurre un proceso de óxido-reducción por acción de los microorganismos adheridos en la superficie sólida, es decir, que ocurren procesos biológicos, los cuales se componen por cuatro etapas que están relacionadas entre sí, ya que los productos generados en cada etapa son necesarios para proseguir a la otra etapa, como se muestra en la **figura 28** [54, 55].

**Figura 28.**

*Esquema del proceso de la digestión anaerobia*



**Nota.** Diagrama del proceso de la digestión anaerobia y sus etapas. Tomado de: E. Padilla, *Evaluación de un filtro anaerobio de flujo ascendente para tratar agua residual de rastro*, Tesis. Facultad, Centro de investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A. C., Guadalajara, 2010.

A continuación, se describe las etapas de la digestión anaerobia:

- **Hidrólisis:** la materia orgánica compleja (carbohidratos, grasa y proteínas) presente en el agua en solución o diluidas se transforman en moléculas simples (carbohidratos simples, ácidos grasos y aminoácidos) por acción del metabolismo de las bacterias hidrolíticas y enzimas extracelulares generando dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e hidrogeno (H<sub>2</sub>) [54].
- **Acidogénesis:** la pared celular de las bacterias acidogénicas logran filtrar y separar partículas de mayor tamaño en el exterior y la membrana se

encarga de seleccionar, permitiendo el paso al interior, en esta etapa se genera hidrogeno ( $H_2$ ) y Ácidos Grasos [54].

- **Acetogénesis:** Los ácidos grasos son oxidados de manera parcial por las bacterias acetogénicas, generando ácido acético, dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e hidrogeno ( $H_2$ ), esta etapa es indispensable, ya que a medida que se producen los ácidos orgánicos, estos deben consumirse [54].
- **Metanogénesis:** el ácido acético, dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e hidrogeno ( $H_2$ ) se empujan como materia prima para las bacterias metanogénicas, las cuales metabolizan la materia prima formando metano y dióxido de carbono ( $CO_2$ ) [54].

En los filtros anaerobios comúnmente no se recircula el efluente, a excepción de presentar concentración de contaminantes elevadas y en el caso de los filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA), estos operan con una alimentación por la parte inferior del reactor, es decir, que opera inundándose. El medio de empaque del filtro permite retener los sólidos dentro del filtro, es decir, que actúa como un separador de los sólidos-líquidos-gases, como se mencionó anteriormente, y de promover el flujo uniforme en el reactor, permitiendo la acumulación de biomasa a partir de una barrera que evita el lavado de los sólidos [55-57].

De esta manera, los filtros anaerobios requieren de una estructura resistente (evitar la reacción con el medio y los microorganismos), ser ligero (construcción de filtros no pesados de grandes alturas), tener grandes áreas específicas (adherencia de una cantidad de microorganismos), alta porosidad (área libre para la acumulación de microorganismos y reducción del atascamiento) y presentar rugosidad en la superficie (asegura buena adherencia y alta porosidad) [55].

El filtro anaerobio puede presentar una geometría cilíndrica o rectangular y el material de empaque, puede estar en un 50% o 70% de la altura del útil del reactor o en su totalidad, comúnmente estos materiales son de plástico corrugado, módulos tubulares o anillos de plástico y presentar un área superficial específica de  $100\text{ m}^2/\text{m}^3$ ; para agua residuales domésticas se emplean generalmente los empaques tubulares con velocidades bajas para prevenir el lavado de la biomasa [57].

Para el filtro anaerobio, uno de los factores importantes en su diseño es la temperatura, ya que de ella depende el crecimiento bacteriano para la descomposición de la materia orgánica del agua residual, para ello se considera que el clima presente en Colombia varía a lo largo del territorio y el tiempo, lo cual se considera como un recurso importante para el país debido a las actividades comerciales realizadas por el hombre [58].

La temperatura del aire se ve directamente afectada por la ubicación geográfica, para el caso de la región andina la temperatura se caracteriza de acuerdo con sus pisos térmicos, en el cual disminuye a medida que aumenta la altura sobre el nivel del mar, mientras que para la costa atlántica ocurre una fluctuación de entre 24 °C y 28 °C o 28 °C y 30 °C, en la región Orinoquia y amazónica, la temperatura media es uniforme oscilando en un rango de 24 °C a 28 °C, al igual que en la región pacífica, que oscila entre los mismo valores [58].

Estos valores son importantes de destacar, debido a que es uno de los parámetros más monitoreados, ya que como se mencionó anteriormente afecta el crecimiento de las bacterias, es decir que impacta su cinética bioquímica, siendo un intervalo de temperatura recomendado entre 25 °C a 45 °C con un rango óptimo de 33 °C a 34 °C, sin embargo, su control depende de la temperatura ambiente y en su caso de la temperatura que se quiere manejar [59].

Teniendo en cuenta lo anterior se procede a dimensionar el filtro anaerobio.

- **Ecuaciones de diseño del Filtro Anaerobio:**

Para el dimensionamiento y diseño del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA), se considera un reactor rectangular para la unidad compacta y se tiene en cuenta las siguientes ecuaciones:

**Tabla 39.**

*Ecuaciones de diseño del Filtro Anaerobio*

<b>Ecuación</b>	<b>Donde</b>	<b>Ref.</b>
<p><b>Ecuación 7. Área del FAFD en función de la longitud y ancho</b></p> $A_{FAFA} = a_{FAFA} * l_{FAFA}$	$A_{FAFA} = \text{Área del FAFD (m}^2\text{)}$ $a_{FAFA} = \text{Ancho del FAFD (m)}$ $l_{FAFA} = \text{Longitud del FAFD (m)}$	[57]
<p><b>Ecuación 8. Volumen total del FAFD</b></p> $V_{TFADA} = A_{FAFA} * h_{TFADA}$	$V_{TFADA} =$ $\text{Volumen total del FAFD (m}^3\text{)}$ $A_{FAFA} = \text{Área del FAFD (m}^2\text{)}$ $h_{TFADA} = \text{Altura total del FAFD (m)}$	[57]
<p><b>Ecuación 9. Carga Hidráulica del FAFD en función del caudal y el volumen</b></p> $CHS_{FAFA} = \frac{Q}{A_{FAFA}}$	$CHS_{FAFA} = \text{Carga Hidráulica del FAFD (m}^3 / (\text{m}^2 \text{ d}))$ $A_{FAFA} = \text{Área del FAFD (m}^2\text{)}$ $Q = \text{Caudal del Afluente (m}^3/\text{d)}$	[57]
<p><b>Ecuación 10. Profundidad total del FAFD</b></p> $h_{TFADA} = h_{lf} + h_{bl} + h_{bd}$	$h_{TFADA} = \text{Altura total del FAFD (m)}$ $h_{lf} = \text{Altura del lecho filtrante (m)}$ $h_{bl} = \text{Altura del borde libre (m)}$ $h_{bd} = \text{Altura de bajo drenaje (m)}$	[57]
<p><b>Ecuación 11. Volumen del lecho filtrante</b></p> $V_{lf} = A_{FAFA} * h_{lf}$	$V_{lf} = \text{Volumen del lecho filtrante (m}^3\text{)}$ $A_{FAFA} = \text{Área del FAFD (m}^2\text{)}$ $h_{lf} = \text{Altura del lecho filtrante (m)}$	[57]
<p><b>Ecuación 12. Tiempo de residencia hidráulica del FAFD</b></p> $THR_{FAFA} = \frac{V_{lf}}{Q}$	$THR_{FAFA} = \text{Tiempo de residencia hidráulica del FAFD (h)}$ $V_{lf} =$ $\text{Volumen del lecho filtrante (m}^3\text{)}$ $Q = \text{Caudal del Afluente (m}^3/\text{d)}$	[57]

**Nota.** Ecuaciones de diseño del filtro anaerobio para determinar el área, volumen y tiempo de retención.

- Cálculo del área del Filtro Anaerobio

Para el cálculo del área del filtro anaerobio, se considera las dimensiones establecidas en el sedimentador, por tal motivo, se aplica la **ecuación 7**, sin embargo se considera la recomendación establecida en el RAS 2000 para el ancho y longitud (base ≤ largo ≤ 3 la base).

- Cálculo del volumen del Filtro Anaerobio

Para el cálculo del volumen del filtro anaerobio, al igual que el área, se considera que la recomendación del RAS 2000 para la relación entre la altura y la longitud (largo  $\leq 2$  la altura del filtro) y un rango para la altura del filtro ( $0,60 \text{ m} \leq \text{altura del filtro} \leq 1,80 \text{ m}$ ). Sin embargo, como el propósito del SITARD es ser una unidad compacta de tratamiento, donde el espacio es reducido, la profundidad del reactor se deja igual al del sedimentador, logrando obtener el volumen al aplicar la **ecuación 8**.

Adicionalmente, para determinar el volumen y altura del medio filtrante, se considera que el medio filtrante ocupa entre un 50 a 70% del filtro, además de considerar, de acuerdo con el RAS 2000, que debe dejarse un 15% de la profundidad total para la homogenización de la salida del agua residual tratada, para estos cálculos se aplica la **ecuación 10** y **ecuación 11**

- Cálculo del tiempo de residencia hidráulica del filtro anaerobio

El tiempo de retención se calcula aplicando la **ecuación 12**, sin embargo, se considera las recomendaciones del RAS 2000 expresadas en la tabla .

**Tabla 40.**

*Tiempos de retención hidráulica para filtros anaerobios*

<b>Rango concentración DBO (mg/L)</b>	<b>Tiempo de retención máximo (horas)</b>	<b>Tiempo de retención máximo (horas)</b>
50 – 80	3	12
80 – 300	2.5	12

**Nota.** MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO, “Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento básico RAS – 200: Sección II Título E Tratamiento de Aguas Residuales,” MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO, 2000.

- **Dimensionamiento del Filtro Anaerobio:**

Al aplicar las ecuaciones anteriores (**ecuaciones 7** a la **ecuación 12**), se obtiene el siguiente dimensionamiento del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA):

**Tabla 41.***Dimensionamiento del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente*

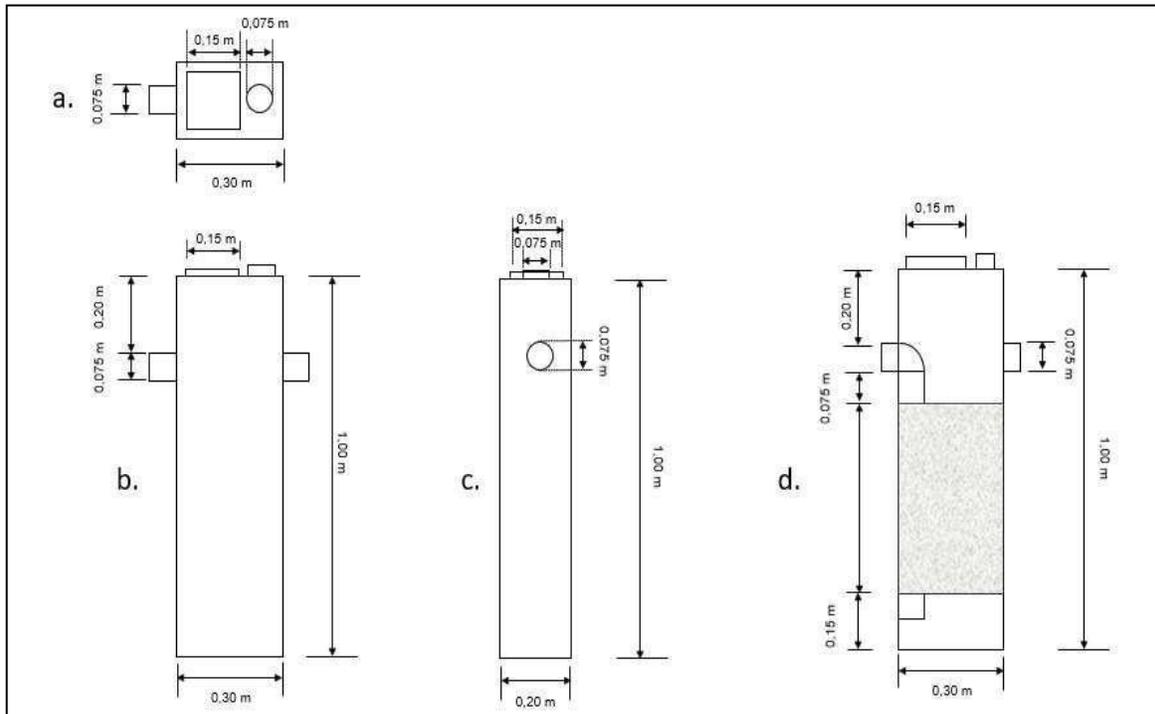
<b>Unidad de tratamiento: Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA)</b>	
<b>Parámetros de diseño</b>	<b>Valor</b>
Caudal (m <sup>3</sup> /d)	1,6
<b>Dimensión del Reactor</b>	<b>Valor</b>
Ancho (m)	0,20
Longitud (m)	0,30
Profundidad (m)	1
Área (m <sup>2</sup> )	0,06
Volumen FAFA (m <sup>3</sup> )	0,06
<b>Medio Filtrante</b>	<b>Valor</b>
Alto (m)	0,50
Volumen (m <sup>3</sup> )	0,03
<b>Bordes</b>	<b>Valor</b>
Altura borde libre (m)	0,35
Altura fondo falso (m)	0,15
<b>Factor</b>	<b>Valor</b>
Tiempo de Residencia (h)	0,45

**Nota.** Dimensionamiento del Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente a partir del desarrollo de las ecuaciones de diseño (ver cálculos en el **Anexo 3**).

▪ **Plano del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente:**

**Figura 29.**

*Plano del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente del SITARD*



**Nota** Plano con el dimensionamiento del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente donde: **a.** Plano con vista superior, **b.** Plano con vista de Frente, **c.** Plano con vista Izquierda y **d.** Plano con Vista Interna.

**4.2.3.iii Diseño del Filtro de Carbón Activado Granular:** La filtración es un proceso terciario aplicado en el tratamiento de aguas residuales con el propósito de remover los sólidos en suspensión, los cuales son retenidos a través de un lecho filtrante, es decir, que el proceso de filtración consiste en el paso de un fluido a través del medio poroso reteniendo los sólidos en suspensión, y así a su vez, reduciendo el color, turbidez e impurezas del afluente hasta lograr un nivel de aceptación. Para el paso del fluido sobre el lecho, se requiere de un gradiente de una fuerza impulsora que lo permita, como es el caso de la gravedad, vacío, presión, fuerza centrífuga o un gradiente de saturación [60].

La filtración por medio de carbón activado permite reducir elementos químicos y microorganismos del agua residual, ya que estos se adsorben o adhieren en los microporos de los gránulos debido a su relación de área por gramo, alcanzando un valor de área superficial de 500 m<sup>2</sup>/g a 1500 m<sup>2</sup>/g, adicionalmente, el carbón activado granular presenta partículas con tamaño de 0,695 mm a 2,38 mm y sus gránulos están fracturados, generando diversos diámetros [60 - 62].

Los factores que influyen en la adsorción son el área superficial del adsorbente, ya que a mayor área específica, mayor será el espacio disponible de adsorción, lo que viene influenciado por la porosidad del material filtrante y la polaridad, ya que si los compuestos son polares, será retenidos por un adsorbente polar o viceversa, para el caso del carbón activado, este presenta la capacidad de adsorber en su superficie externa e interna moléculas orgánicas debido al tamaño de los poros, debido a que su tamaño reducido que genera que exista un desequilibrio de fuerzas lo que a su vez provoca que se retengan moléculas adyacentes a la superficie, este fenómeno se le conoce como fuerzas de Van Der Waals, además, debido a que este de tipo de fuerzas no son fuertes, se presenta la posibilidad de eliminar el adsorbente, logrando que sea reutilizado [60, 63].

La adsorción con carbón activado es considerada un método de tratamiento sencillo y rentable, capaz de retener contaminante metálicos y recalcitrantes que no son removidos por los tratamientos biológicos, ya que su estructura química permite la interacción con moléculas polares y no polares en sus sitios activos; su capacidad

de adsorción, como se mencionó anteriormente, se encuentra definido por el tamaño del poro, logrando presentar una eficiencia de remoción cercana al 99% en los componentes bacteriológicos del agua, además de la materia orgánica, siendo considerado como el adsorbente universal [60, 64].

El filtro de carbón activado es diseñado para retener sustancias polares y no polares, como es el caso de los aceites, cloro o derivados, sustancias que generan un mal sabor u olor ofensivo, materia orgánica, microorganismos, herbicidas o pesticidas sin generar residuos mejorando sus propiedades organolépticas; su tiempo efectivo depende de la calidad del carbón, así como las características del afluente y rendimiento de las unidades de tratamiento anteriores, siendo estos factores influyentes en el tratamiento del agua residual de las zonas rurales, ya que presentan un alto grado de variabilidad e incertidumbre [65].

Los medios filtrantes se especifican a partir de su tamaño efectivo (tamaño de los granos del 10%), Coeficiente de uniformidad (relación entre el tamaño efectivos del 60% y el tamaño efectivo) y la forma (esfericidad, en la que relaciona el diámetro con la velocidad de sedimentación) y su operación se divide en una serie de etapas [66].

- Primera etapa: acondicionamiento interno del filtro [66].
- Segunda etapa: se presenta la mayor remoción de partículas [66].
- Tercera etapa: la capacidad de remoción es agotada, ocurre una saturación lo que genera el rompimiento y traspaso de material particulado [66].
- Cuarta etapa: se alcanza de nuevo una estabilidad – proceso de lavado [66].

En el tratamiento de aguas residuales permite remover sólidos en suspensión o no sedimentables, DBO, DQO o virus, asegurando así una calidad del agua. Adicionalmente, para el tratamiento de aguas residuales, el filtro requiere que los granos sean grandes de modo que pueda almacenar el volumen de materia retenida [27].

▪ **Ecuaciones de diseño del Filtro de Carbón Activado:**

Para el dimensionamiento y diseño del Filtro de Carbón Activado Granular, se considera un filtro rectangular para la unidad compacta y se tiene en cuenta las siguientes ecuaciones:

**Tabla 42.**

*Ecuaciones de diseño del Filtro de Carbón Activado Granular*

<b>Ecuación</b>	<b>Donde</b>	<b>Ref.</b>
<p><b>Ecuación 13.</b> Área del filtro en función de la longitud y ancho</p> $A_F = a_F * l_F$	$A_F = \text{Área del Filtro (m}^2\text{)}$ $a_F = \text{Ancho del Filtro (m)}$ $l_F = \text{Longitud del Filtro (m)}$	[67]
<p><b>Ecuación 14.</b> Volumen total del Filtro</p> $V_{TF} = A_F * h_{TF}$	$V_{TF} = \text{Volumen total del Filtro (m}^3\text{)}$ $A_F = \text{Área del Filtro (m}^2\text{)}$ $h_{TF} = \text{Altura total del Filtro (m)}$	[63]
<p><b>Ecuación 15.</b> Altura Total del filtro</p> $h_{TF} = h_{lf} + h_{bl} + h_{ff}$	$h_{TF} = \text{Altura total del Filtro (m)}$ $h_{lf} = \text{Altura del lecho filtrante (m)}$ $h_{bl} = \text{Altura del borde libre (m)}$ $h_{ff} = \text{Altura del fondo falso (m)}$	[67]
<p><b>Ecuación 16.</b> Volumen del lecho Filtrante</p> $V_{LF} = A_F * h_{LF}$	$V_{LF} = \text{Volumen del Lecho Filtrante (m}^3\text{)}$ $A_F = \text{Área del Filtro (m}^2\text{)}$ $h_{LF} = \text{Profundiad de Lecho Filtrante (m)}$	[63]
<p><b>Ecuación 17.</b> Tiempo de residencia hidráulica del filtro</p> $THR_F = \frac{V_{LF}}{Q}$	$THR_F = \text{Tiempo de residencia hidráulica del Filtro (h)}$ $V_{LF} = \text{Volumen del Lecho Filtro (m}^3\text{)}$ $Q = \text{Caudal del Afluente (m}^3\text{/d)}$	[63]
<p><b>Ecuación 18.</b> Cantidad del carbón</p> $m_{CA} = \rho_F * V_{TF}$	$m_{ca} = \text{Masa de carbón activado (kg)}$ $\rho_F = \text{Densidad aparente del Filtro (kg/m}^3\text{)}$ $V_{TF} = \text{Volumen total del Filtro (m}^3\text{)}$	[67]

**Nota.** Ecuaciones de diseño del filtro para determinar el área, volumen y tiempo de retención.

- Cálculo del área y volumen del Filtro

Para el cálculo del área y volumen del filtro, se considera las dimensiones establecidas en el sedimentador y filtro anaerobio, en torno a el ancho, longitud y profundidad, por tal motivo, se aplica la **ecuación 13** y la **ecuación 14**, para determinar el área y volumen respectivamente.

- Cálculo de la altura total del filtro

A partir de la altura total del filtro, la cual se estableció para determinar el volumen, se determina la profundidad del filtro, la profundidad del nivel sobre el medio filtrante hasta la superficie y el borde libre desde la parte inferior. Para ello se considera la **ecuación 15**, considerado que la recomendación de una altura del medio filtrante de 630 mm a 1220 mm [61].

- Cálculo del volumen del Lecho Filtrante

Para el cálculo del volumen del lecho o medio filtrante, se considera el área ya establecida y la profundidad del lecho filtrante, para ello, se aplica la **ecuación 16**.

- Masa de Carbón activado granular implementado

Para determinar la masa empleada de carbón activado granular, se considera el volumen del lecho filtrante y la densidad aparente, para ello se aplica la **ecuación 18**. Por este motivo, se contempla las propiedades del carbón activado, las cuales se muestran en la **tabla 43**.

**Tabla 43.***Configuración del medio filtrante*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Tamaño Efectivo (mm)	0,55 – 0,65
Coefficiente de Uniformidad	1,7
Profundidad (m)	760
Area Superficial (m <sup>2</sup> /g)	> 1100
Densidad Aparente (kg/m <sup>2</sup> )	433 – 465
Densidad de partícula (g/cm <sup>3</sup> )	1,30 – 1,40
Tamaño de partícula (µm)	12 x 40

**Nota.** Parámetros del medio filtrante que funcionan como una guía de diseño. Tomado de: J. Arana, *Evaluación de la aplicación de carbón activado granular en la filtración del agua clarificada del río Cauca*, trabajo de grado, facultad de ingeniería, universidad del valle, 2016 y L. Bonilla, *Tratamiento de aguas residuales de textilería utilizando carbón activado*, 1ra edición, 2017, COMPAS, Guayaquil – Ecuador.

- **Dimensionamiento del Filtro:**

Al aplicar las ecuaciones anteriores (**ecuaciones 13 a la ecuación 18**), se obtiene el siguiente dimensionamiento del Filtro de Carbón Activado Granular:

**Tabla 44.***Dimensionamiento del Filtro de Carbón Activado Granular:*

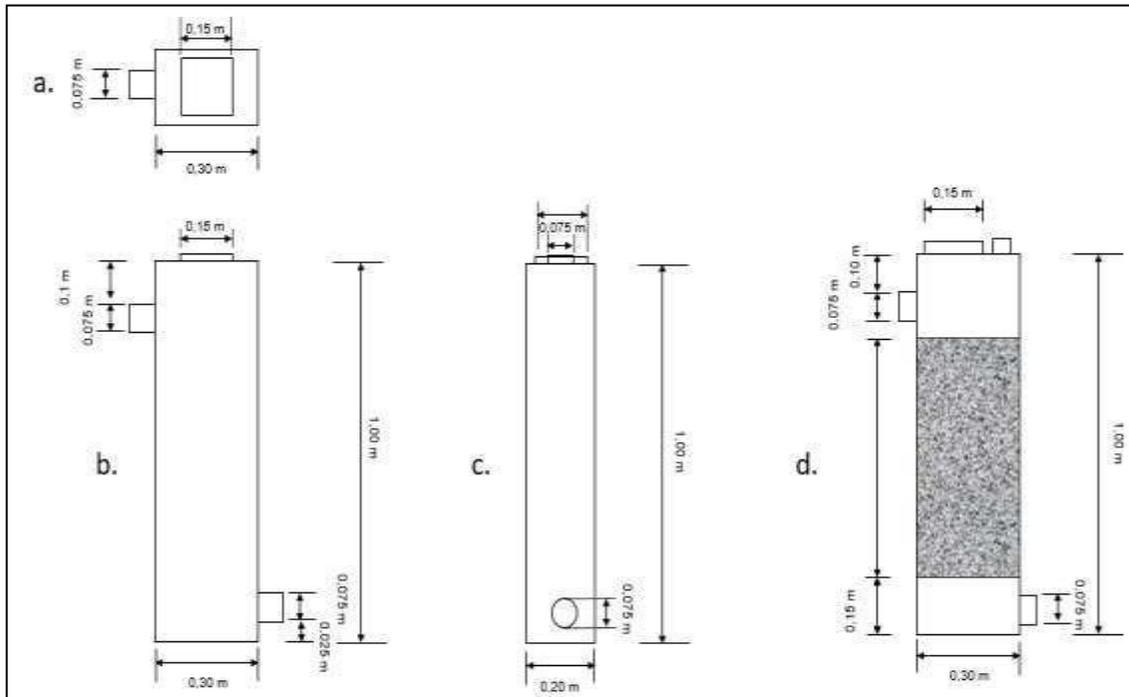
<b>Unidad de tratamiento: Filtro de Carbón Activado Granular</b>	
<b>Parámetros de diseño</b>	<b>Valor</b>
Caudal (m <sup>3</sup> /d)	1,6
<b>Dimensión del Filtro</b>	<b>Valor</b>
Ancho (m)	0,20
Longitud (m)	0,30
Profundidad (m)	1
Área (m <sup>2</sup> )	0,06
Volumen filtro (m <sup>3</sup> )	0,06
<b>Lecho Filtrante</b>	<b>Valor</b>
Altura del lecho filtrante (m)	0,63
Volumen filtro (m <sup>3</sup> )	0,0378
<b>Espacio entre el filtro</b>	<b>Valor</b>
Altura del borde libre (m)	0,22
Altura fondo falso (m)	0,15
<b>Factor</b>	<b>Valor</b>
Tiempo de Residencia (h)	0,57
Masa del carbón activado granular(kg)	52,92

**Nota.** Dimensionamiento del Filtro de Carbón Activado Granular a partir del desarrollo de las ecuaciones de diseño (*ver cálculos en el Anexo 4*).

- **Plano del Filtro:**

**Figura 30.**

*Plano del filtro de carbón activado granular del SITARD*



**Nota.** Plano con el dimensionamiento del Filtro de Carbón Activado Granular donde: **a.** Plano con vista superior, **b.** Plano con vista de Frente, **c.** Plano con vista Izquierda y **d.** Plano con Vista Interna.

En la **tabla 45** se consolida el dimensionamiento de las tres unidades de tratamiento que conforman al Sistema Individual de Tratamiento de Agua Residual Doméstica (SITARD), la cual funciona como guía para el diseño del plano del sistema, como se muestra en la **figura 31**.

**Tabla 45.**

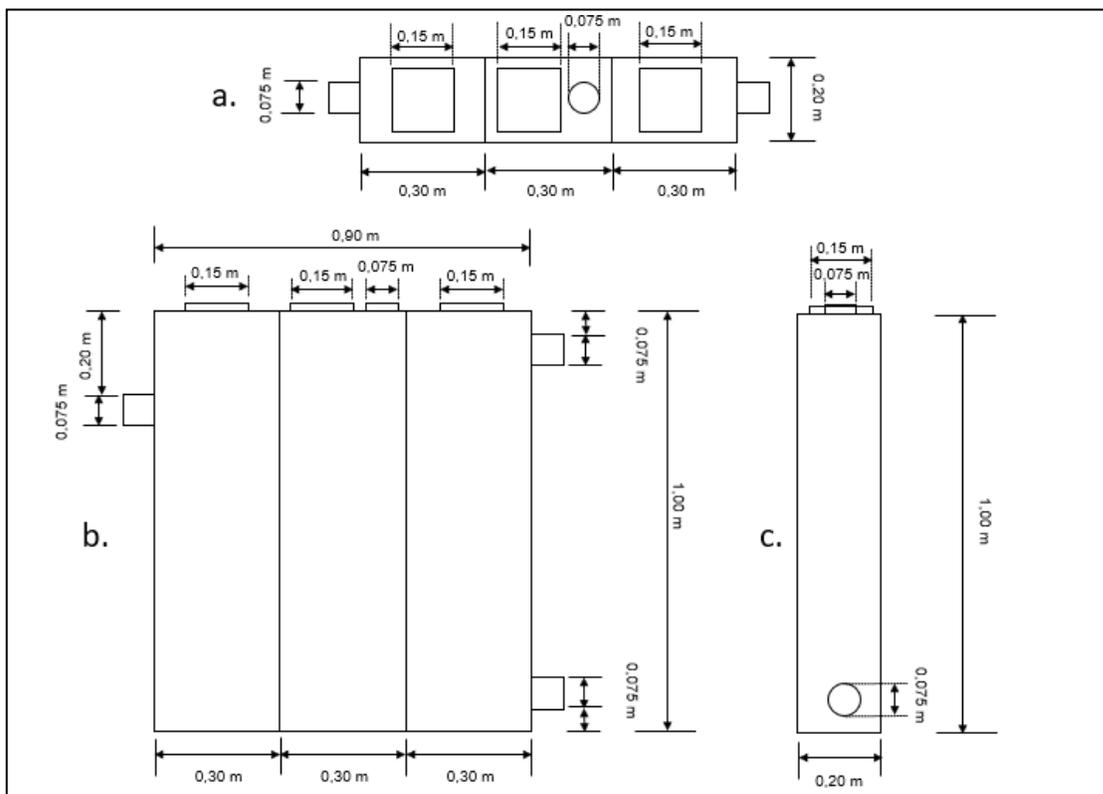
*Dimensionamiento del SITARD*

<b>Sedimentador Primario</b>		<b>Filtro Anaerobio de Flujo Descendente</b>		<b>Filtro de Carbón Activado Granular</b>	
Profundidad (m):	1	<b>Filtro</b> Profundidad (m):	1	<b>Filtro</b> Profundidad (m):	1
Ancho (m):	0,20	Ancho (m):	0,20	Ancho (m):	0,20
Longitud (m):	0,30	Longitud (m):	0,30	Longitud (m):	0,30
Área (m <sup>2</sup> ):	0,06	Área (m <sup>2</sup> ):	0,06	Área (m <sup>2</sup> ):	0,06
Volumen (m <sup>3</sup> ):	0,06	Volumen (m <sup>3</sup> ):	0,06	Volumen (m <sup>3</sup> ):	0,06
		<b>Lecho filtrante</b>		<b>Lecho filtrante</b>	
		Altura (m):	0,50	Altura (m):	0,63
		Volumen (m <sup>3</sup> ):	0,03	Volumen (m <sup>3</sup> ):	0,0378
		<b>Espacio entre el filtro</b>		<b>Espacio entre el filtro</b>	
		Borde libre (m):	0,35	Borde libre (m):	0,22
		Fondo falso (m):	0,15	Fondo falso (m):	0,15

**Nota.** Dimensionamiento del Sistema Individual de Tratamiento de Agua Residual Doméstica (SITARD) .

**Figura 31.**

*Plano del SITARD*



**Nota.** Plano con el dimensionamiento del Sistema Individual de Tratamiento de Agua Residual Doméstica (SITARD) donde: **a.** Plano con vista superior, **b.** Plano con vista de Frente y **c.** Plano con vista Izquierda.

**4.2.3.iv Recomendaciones para el diseño:** Para el diseño del Sistema Individual de Tratamiento de Agua Residual Doméstica (SITARD) como una unidad compacta, se presenta las siguientes consideraciones que complementa y justifica el dimensionamiento detallado del sistema presentado en la figura 31.

- **Sedimentador:** Para el sedimentador, se toman las recomendaciones establecidas para un tanque séptico en el dimensionamiento interno: la profundidad total no debe ser inferior a 0,75 m, el espacio libre entre el nivel de agua y el techo no debe ser menor a 0,10 m, los diámetros mínimos interno de la tubería de entrada y salida deben ser de 100 mm o 75 mm.

Adicionalmente, se recomienda lozas removibles para la limpieza o inspección de 0,60 por 0,60 m o tapas circulares de 0,60 m [69].

- **Filtro Anaerobio:** Se determina para el filtro anaerobio de flujo ascendente, la tubería de salida se encuentre a 20 - 30 cm por debajo del techo del filtro y los diámetros de entrada y salida, se recomiendan que sean de 75 mm y debe presentar una tapa o laza de inspección [69].
- **Filtro de carbón Activado:** Se recomienda instalar dos tubos metálicos pasamuros de 25 mm de diámetro con un nivel de rebosamiento de 5 cm por debajo del borde superior del filtro y un adaptador conectado a la tubería; en la parte inferior se recomienda instalar una tubería perforada (metálica o plástica) del mismo diámetro para la salida del efluente de la unidad de tratamiento. Además de instalar tubería adicional con tapa para un futuro retro lavado [69].

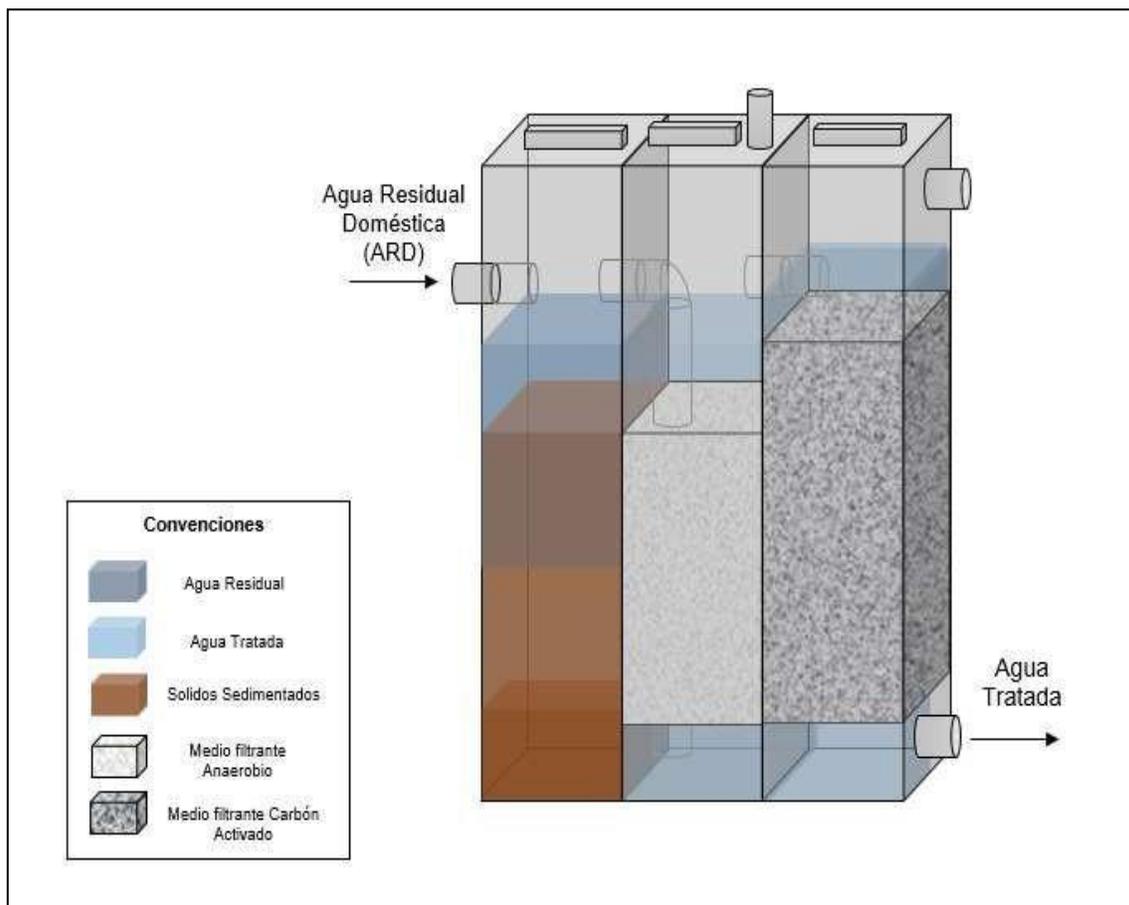
A nivel general para el SITAR de presenta las siguientes recomendaciones en la conservación de distancias mínimas:

- 1,50 m distante a las diferentes construcciones [69].
- 3,00 m distante de árboles o redes públicas de abastecimiento de agua [69].
- 25,00 m distantes de pozos o cuerpos de agua [69].
- 3,00 m distante de piscinas [69].

Una vez establecido el dimensionamiento de las unidades de tratamiento siguiendo las ecuaciones y recomendaciones, mostrado anteriormente en la **tabla 44** y **figura 29**, se construye el plano del SITARD con vista 3D, como un factor adicional para el diseño detallado, que permita observar el propósito del SITARD al pasar agua residual, generando agua tratada, como se muestra a continuación, en la **figura 32**.

**Figura 32.**

*Plano del SITARD con vista en 3D.*



**Nota.** Plano del Sistema Individual de Tratamiento de Agua Residual Doméstica (SITARD) con vista en 3D .

## **5. EVALUACIÓN TÉCNICA E HIDRODINÁMICA DEL SISTEMA INDIVIDUAL DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL DOMÉSTICA (SITARD).**

En el presente capítulo se realiza la evaluación técnica e hidrodinámica del SITARD; en la primera parte, se realiza una evaluación técnica que permite determinar la remoción global esperada del SITARD a partir de las eficiencias típicas de remoción de las unidades de tratamiento seleccionadas y en la segunda parte, una evaluación hidrodinámica, que permite determinar el comportamiento del agua residual al pasar por las unidades de tratamiento.

### **5.1. Evaluación Técnica del diseño del SITARD para una unidad habitacional en la zona rural**

La evaluación técnica para el Sistema Individual de Tratamiento de Agua Residual Doméstica (SITARD) se basa en el seguimiento a las características tanto fisicoquímicas como microbiológica del agua residual que pasa por el sistema con el fin de determinar su comportamiento al pasar por las unidades de tratamiento, logrando determinar una eficiencia de remoción de la carga contaminante [70].

Para la propuesta de SITARD diseñada, se determina la eficiencia global que puede llegar a tener el sistema, al presentar un tren de tratamiento que combina los tratamientos primarios, secundarios y terciarios, a partir de la eficiencia típica de las unidades de tratamiento, actuando como una remoción en serie. Para ello, se recopila mediante la bibliografía las eficiencias de las unidades seleccionadas para la SITARD, como se muestra en la **tabla 46**.

**Tabla 46.***Eficiencia típica de remoción de las unidades de tratamiento del SITARD*

Unida de Tratamiento	Eficiencia de Remoción		
	SST (%)	DBO (%)	DQO (%)
Sedimentador Primario	50	30	30
Filtro Anaerobio	60	65	60
Filtro de Carbón Activado	64	53	47

**Nota.** Eficiencia típica de remoción de solidos suspendidos totales (SST), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Demanda química de Oxígeno (DQO) de las unidades de tratamiento seleccionadas para el SITARD. Tomado de: J. A. Romero. *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y principios de diseño*. 3ª ed. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2004; CONAGUA (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA), *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento – Introducción Al Tratamiento De Aguas Residuales Municipales*, México: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

A partir de las eficiencias de las unidades de tratamiento y las ecuaciones (**ecuación 19** a la **ecuación 21**), se determina la remoción de cada contaminante como se muestra a continuación:

**Ecuación 19.** *Porcentaje de Remoción de SST*

$$E_{SST(i)} = \frac{SST_0 - SST_f}{SST_0} * 100\%$$

Donde:

$E_{SST(i)}$  = Eficiencia de Remocion de SST

$SST_0$  = Concentración inicial de SST

$SST_f$  = Concentración final de SST

$i$  = Puede ser el Sedimentador primario, Filtro Anaerobio o Filtro de Carbon Activado

**Ecuación 20.** *Porcentaje de Remoción de DBO*

$$E_{DBO(i)} = \frac{DBO_0 - DBO_f}{DBO_0} * 100\%$$

Donde:

$E_{DBO(i)}$  = Eficiencia de Remocion de DBO

$DBO_0$  = Concentración inicial de DBO

$DBO_f$  = Concentración final de DBO

$i$  = Puede ser el Sedimentador primario, Filtro Anaerobio o Filtro de Carbon Activado

**Ecuación 21.** Porcentaje de Remoción de DQO

$$E_{DQO(i)} = \frac{DQO_0 - DQO_f}{DQO_0} * 100\%$$

Donde:

$E_{DQO(i)}$  = Eficiencia de Remoción de DQO

$DQO_0$  = Concentración inicial de DQO

$DQO_f$  = Concentración final de DQO

$i$  = Puede ser el Sedimentador primario, Filtro Anaerobio o Filtro de Carbon Activado

### 5.1.1. Eficiencia en la remoción de contaminantes en el Sedimentador Primario

En la **tabla 47**, se muestra la remoción de SST, DBO y DQO al aplicar la **ecuación 19** a la **ecuación 21**, considerando que la carga contaminante inicial es el valor del afluente de la unidad habitacional, comparando el valor obtenido con la normatividad colombiana.

**Tabla 47.**

*Caracterización del Agua Residual Domestica en el Sedimentador Primario*

Parámetro	% Remoción	Valor Afluente	Valor Efluente	Nivel de aceptación (Resolución 0631 de 2015)
SST	50	200 mg/L	100 mg/L	90 mg/L
DBO	30	233 mg/L	163,1 mg/L	90 mg/L
DQO	30	533 mg/L	373,1 mg/L	180 mg/L

**Nota.** Valores de SST, DBO y DQO del agua residual al ingreso y salida del sedimentador primario del SITARD.

De acuerdo con los resultados esperados en el efluente generado en el sedimentador primario, al compararlo con los niveles de aceptación de la Resolución 0631 del 2015, el vertimiento generado sigue sobrepasando los límites, evidenciando la generación de un vertimiento contaminante que requiere de otra unidad de tratamiento.

### 5.1.2. Eficiencia en la remoción de contaminantes en el Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA)

En la **tabla 48**, se muestra la remoción de SST, DBO y DQO del Filtro Anaerobio al aplicar la **ecuación 19** a la **ecuación 21**, considerando que la carga contaminante inicial es el valor del efluente generado por el sedimentador primario, comparando el valor obtenido con la normatividad colombiana.

**Tabla 48.**

*Caracterización del Agua Residual Domestica en el Filtro Anaerobio*

Parámetro	% Remoción	Valor Afluente	Valor Efluente	Nivel de aceptación (Resolución 0631 de 2015)
SST	60	100 mg/L	40 mg/L	90 mg/L
DBO	60	163,1 mg/L	57,1 mg/L	90 mg/L
DQO	50	373,1 mg/L	149,2 mg/L	180 mg/L

**Nota.** Valores de SST, DBO y DQO del agua residual al ingreso y salida del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA) del SITARD.

Los resultados esperados en el efluente generado en el filtro anaerobio comparados con los niveles de aceptación de la Resolución 0631 del 2015, evidenciando el cumplimiento de los niveles de aceptación, sin embargo, los valores esperados siguen siendo superiores, por tal motivo, se implementa un filtro que permita retener los sólidos y materia orgánica remanente.

En el Filtro Anaerobio, como se mencionó anteriormente, al ocurrir procesos bioquímicos en la degradación de la materia orgánica a causa de las bacterias, se produce un subproducto denominado biogás, que contiene principalmente metano, dióxido de carbono e impurezas, generando entre un 55 a 70 por ciento de metano en el biogás e inclusive llegando a 80, 30 a 45% de dióxido de carbono y los demás en trazas de otros gases; y aunque para el SITARD no se implementó un sistema de recolección, comúnmente se emplea placas con vertederos V y tubos perforados [57, 72].

Al determinar el DQO del efluente, el cálculo teórico del biogás producido puede lograrse al aplicar la siguiente ecuación:

**Ecuación 22.**

*Porción de DQO convertida en metano*

$$DQO_{CH_4} = Q (DQO_o - DQO_f) - QDQO_o\gamma_{abs}$$

Donde:

$DQO_{CH_4}$  = Carga de DQo convertida en metano (kg  $DQO_{CH_4}$ /d)

$Q$  = gasto promedio en el afluente ( $m^3/h$ )

$DQO_o$  = Concentración inicial de DQO

$DQO_f$  = Concentración final de DQO

$\gamma_{abs}$  = coeficiente de producción de solidos en terminos de (0,11 a 0,23 kg  $DQO_{lodo}$ /kg  $DQO_{aplicada}$ )

y su producción volumétrica con la siguiente ecuación:

**Ecuación 23.**

*Producción volumétrica de metano*

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{k(T)}$$

Donde:

$Q_{CH_4}$  = Produccion volumetrica de metano ( $m^3/d$ )

$DQO_{CH_4}$  = Carga de DQo convertida en metano (kg  $DQO_{CH_4}$ /d)

Aplicando su corrección con la siguiente ecuación:

**Ecuación 24.**

*Factor de corrección de Temperatura del filtro*

$$k(T) = \frac{P K_{DQO}}{R (273 + T)}$$

Donde:

$P =$  Presion atmosferica (1 atm)

$K_{DQO} =$  DQO correspondiente a una ol de CH<sub>4</sub> (64 g DQO/mol)

$R =$  constante del gas (0,08206 atm L / mol K)

$T =$  Temperatura de operacion del filtro (°C)

Para el caso del SITARD, mediante el cálculo teórico de la remoción de DQO, se logra una producción de 0,149 kg DQO CH<sub>4</sub> por día, lo que equivale a 0,055 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> por día ; dato importante ya que la generación de biogás para estos sistemas de tratamiento, al ser un subproducto, generan beneficios en términos de su utilidad para la unidad habitacional en la zona rural, ya que puede aplicarse para la producción de calor o vapor, generación de electricidad, que puede emplearse en estufas, calentadores, heladeras, lámparas a gas y como combustible en motores de combustión interna, como es el caso de bombo de agua u ordeñadores [ 57,72, 73].

### **5.1.3. Eficiencia en la remoción de contaminantes en el Filtro de carbón Activado Granular**

En la **tabla 49**, se muestra la remoción de SST, DBO y DQO del Filtro de carbón Activado Granular al aplicar la **ecuación 19** a la **ecuación 21**, considerando que la carga contaminante inicial es el valor del efluente generado por el Filtro Anaerobio, comparando el valor obtenido con la normatividad colombiana.

**Tabla 49.***Caracterización del Agua Residual Domestica en el Filtro de carbón Activado*

<b>Parámetro</b>	<b>% Remoción</b>	<b>Valor Afluyente</b>	<b>Valor Efluyente</b>	<b>Nivel de aceptación (Resolución 0631 de 2015)</b>
SST	64	40 mg/L	14,4 mg/L	90 mg/L
DBO	53	57,1 mg/L	26,8 mg/L	90 mg/L
DQO	47	149,2 mg/L	79,1 mg/L	180 mg/L

**Nota.** Valores de SST, DBO y DQO del agua residual al ingreso y salida del Filtro de carbón Activado Granular del SITARD.

Los resultados esperados del efluente generado en el filtro de carbón activado, además de evidenciar el cumplimiento con la normatividad (Resolución 0631 del 2015), demuestra una remoción considerable de la carga contaminante, generando un vertimiento apto para actividades no potables en la unidad habitacional y para descargar al recurso hídrico o zona de infiltración (suelo).

#### **5.1.4. Eficiencia global esperada del SITARD en la remoción de contaminantes.**

Al establecer la remoción de SST, DBO y DQO en las unidades de tratamiento, se determina la remoción global esperada de cada uno de los parámetros del SITARD, siendo un referente, en caso de implementar el sistema, evidenciado en la **tabla 50**, una eficiencia en la remoción superior a las unidades de tratamiento por individual, cumpliendo con los valores del efluente y generando un vertimiento con las condiciones óptimas para ser vertido al recurso hídrico aledaño a la unidad habitacional o a campos de infiltración.

**Tabla 50.**

*Caracterización del efluente del Sistema Individual de Tratamiento de Agua Residual.*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor Afluente</b>	<b>Valor Efluente</b>	<b>% Remoción</b>	<b>Normatividad Nivel de Aceptación</b>
SST	200 mg/L	14,4 mg/L	93%	90 mg/L
DBO	233 mg/L	26,8 mg/L	88%	90 mg/L
DQO	533 mg/L	79,1 mg/L	95%	180 mg/L

**Nota.** Valores de SST, DBO y DQO del agua residual al ingreso y salida del SITARD, generando una remoción global de contaminantes. (Ver Cálculos en el **ANEXO 5**).

## **5.2. Evaluación Hidrodinámica del diseño del SITARD para una unidad habitacional en la zona rural**

La evaluación hidrodinámica es importante, ya que permite determinar o definir las condiciones hidráulicas en la entrada y salida del flujo, logrando determinar el uso óptimo del volumen de agua, en una distribución homogénea, y para el caso del SITARD, una mejor remoción de sólidos dentro de las unidades de tratamiento, para ello se empleó un software de Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD) [74].

La Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD) permite un análisis que involucra el flujo de los fluidos, transferencia de calor, reacciones químicas, entre otras, por medio de simulaciones en computador a partir de ecuaciones diferenciales que, comúnmente, no pueden ser resueltas analíticamente, y en casos, la solución presentada no es una representación correcta de la realidad. Una de las ecuaciones involucradas en la Dinámica de Fluidos Computacionales, es la de Navier - Stokes, la cual permite determinar la velocidad de caída de las partículas a través de un fluido con base en las densidad, viscosidad y tamaño de partículas [75, 76].

Para una simulación en CFD, se requiere de códigos estructurados por algoritmos numéricos que resuelvan problemas de flujo; por este motivo, se implementa un proceso de tres etapas [75].

- **Pre-proceso:**

- En esta etapa, se define la geometría de la región de interés [75].
- Se genera el dominio o malla del volumen de control [75].
- Se elige el fenómeno a modelar [75].
- Se define las propiedades del fluido [75].
- Se define las condiciones de frontera en el volumen de control [75].

- **Solución:**

La solución de los algoritmos generados en la simulación consiste en:

- Integración de las ecuaciones del flujo de los fluidos del volumen de control [75].
- Conversión de ecuaciones integrales a ecuaciones algebraicas [75].
- Solución de las ecuaciones algebraicas mediante iteración, debido a la complejidad de los procesos que resultan ser no lineales [75].

- **Post- proceso :**

Para la obtención de la solución, esta se obtiene a partir de vectores, curvas u otros gráficos, como los son:

- Gráfico de vectores [75].
- Gráfico sombreado [75].
- Gráfico con visualización de la geometría y mallado [75].
- Gráficos en 2D y 3D [75].
- Trayectoria de la partícula [75].
- Generación de paleta de colores relacionada con valores [75].
- Resultados con animación para visualización de datos [75].

Para la evaluación hidrodinámica del SITARD, se empleó un software de dinámica de fluidos computacional, llamado **ANSYS STUDENT**, en su versión académica de libre acceso para estudiantes, siguiendo la siguiente metodología:

- Construcción de la geometría de región de interés para cada una de las unidades de tratamiento. Para ello, se determina el volumen de control, el cual se construye mediante los puntos, líneas y superficies que conforman el

volumen.

- Definición de las regiones sólidas y generación de las mallas con base en la geometría, definiendo las regiones que conforman la estructura diseñada en las unidades de tratamiento; paso importante para la convergencia de una solución como resultado, puesto que la distribución espacial y densidad pueden afectar la solución.
- Definición de los parámetros de la simulación: modelo, características del fluido (agua residual), variables físicas, dominio, condiciones iniciales, entre otras.
- Obtención del resultado de la simulación a partir del código descrito.

Sin embargo, en primera instancia es necesario determinar las variables para la evaluación hidrodinámica, como se muestran en la **tabla 51**.

**Tabla 51.**

*Variables para la evaluación hidrodinámica*

<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>	<b>Ecuación</b>	<b>Donde</b>
Tiempo de residencia	Tiempo o duración en el que tarda en pasar el agua residual a través del sedimentador. Este parámetro permite definir el tiempo mínimo que debe residir el fluido en la unidad de tratamiento.	<p><b>Ecuación 25.</b>  <i>Tiempo de Residencia Hidráulico</i></p> $THR_i = \frac{V_i}{Q}$	<p><math>THR_i</math>            = <i>Tiempo de residencia hidráulica i (h)</i>  <math>V_i</math> = <i>Volumen de i (m<sup>3</sup>)</i>  <math>Q</math> = <i>Caudal del Afluyente (m<sup>3</sup>/ d)</i>  <math>i</math> = <i>unidad de tratamiento</i></p>

Carga Superficial	Es la tasa del flujo (agua residual) por unidad de área superficial del tanque.	<b>Ecuación 26.</b> <i>Carga Superficial</i> $CHS_i = \frac{Q}{A_i}$	$CHS_i = \text{Carga Hidráulica del } i \text{ (m/d)}$ $A_i = \text{Área del } i \text{ (m}^2\text{)}$ $Q = \text{Caudal del Afluyente (m}^3\text{/d)}$ $i = \text{unidad de tratamiento}$
Velocidad del fluido	Es la expresión de la del espacio recorrido por el fluido (agua residual) en una unidad de tiempo.	<b>Ecuación 27.</b> <i>Velocidad del fluido</i> $v_{fi} = \frac{Q}{A_{ti}}$	$v_{fi} = \text{Velocidad del fluido en } i \text{ (m/d)}$ $A_{ti} = \text{Área transversal del } i \text{ (m}^2\text{)}$ $Q = \text{Caudal del Afluyente (m}^3\text{/d)}$ $i = \text{unidad de tratamiento}$
Numero de Reynolds	Numero adimensional que relacionan las fuerzas viscosas con respecto a las fuerzas de inercia del fluido (agua residual), permitiendo determinar si el flujo es laminar, turbulento o transitorio.	<b>Ecuación 28.</b> <i>Numero de Reynolds</i> $Re_i = \frac{v_{fi} D}{\nu}$	$Re_i = \text{Numero de Reynolds}$ $v_{fi} = \text{Velocidad del fluido en } i \text{ (m/s)}$ $D = \text{Diametro de la tubería (m)}$ $\nu = \text{Viscosidad Cinemática (m}^2\text{/s)}$ $i = \text{unidad de tratamiento}$

**Nota.** Descripción de las variables y ecuación para la evaluación hidrodinámica. Tomado de: M. Ortega, *Estudio hidrodinámico de los parámetros de diseño en sedimentadores de flujo horizontal empleados en pequeñas plantas de tratamiento de residuales*, trabajo de diploma, Facultad de Ingeniería hidráulica, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, 2016.

A continuación, se expresan los resultados de los parámetros hidrodinámicos paracada una de las unidades de tratamiento.

**Tabla 52.***Resultado de los variables para la evaluación Hidrodinámica*

<b>Variable</b>	<b>Sedimentador Primario</b>	<b>Filtro Anaerobio</b>	<b>Filtro de Carbón Activado</b>
Tiempo de Residencia (h)	0,90	0,45	0,57
Carga Superficial (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d)	32 – 80	26,67	26,67
Velocidad del fluido entrada (m/s)	0,0042	0,0042	0,0042
Numero de Reynolds	2,82x10 <sup>-10</sup>	2,82x10 <sup>-10</sup>	2,82x10 <sup>-10</sup>

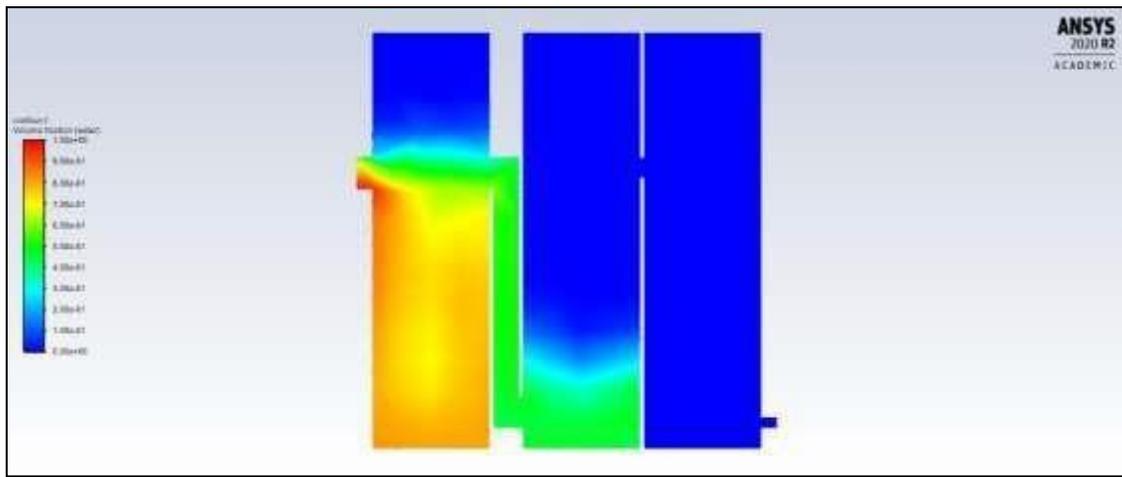
**Nota.** Descripción de las variables y ecuación para la evaluación hidrodinámica (*Ver Cálculos en el ANEXO 7*).

Con los resultados de la **tabla 52**, se establece las condiciones iniciales para la simulación, es decir, que se determina a partir del caudal y la geometría de las unidades de tratamiento, la velocidad con la que ingresa el agua residual domestica a cada una de las unidades de tratamiento, para que de este modo se pueda evidenciar el comportamiento del fluido en el interior por medio del simulador.

Una vez se determina los parámetros importantes para la simulación, se emplea el módulo de diseño de ANSYS para generar una geometría 2D, el cual entrega una solución parcial, mostrando la distribución uniforme del agua residual en cada una de las unidades de tratamiento que conforman el SITARD, como se muestra en la secuencia de la **figura 33** a la **figura 35**.

**Figura 33.**

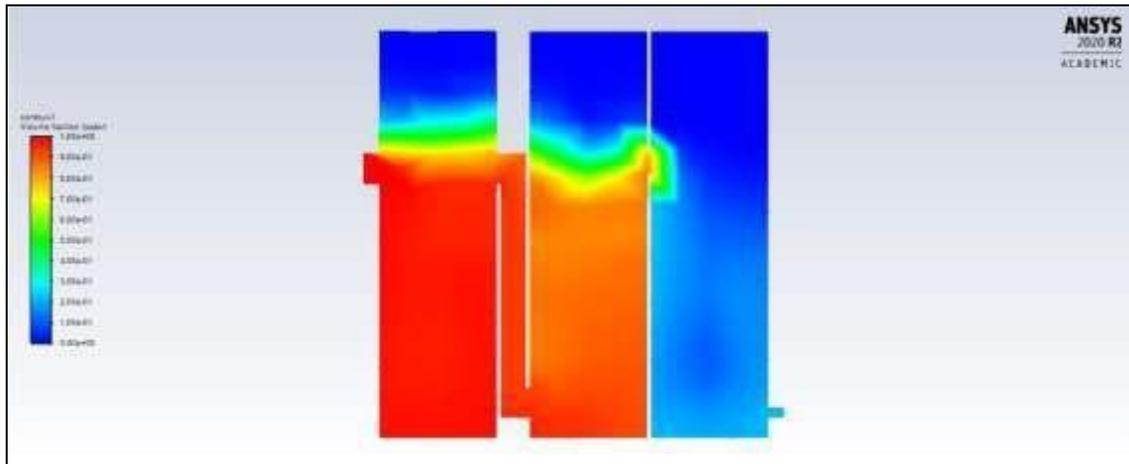
*Distribución del ARD en el Sedimentador Primario (Llenado)*



**Nota.** Proceso del llenado del Sedimentador Primario que compone el SITARD.

**Figura 34.**

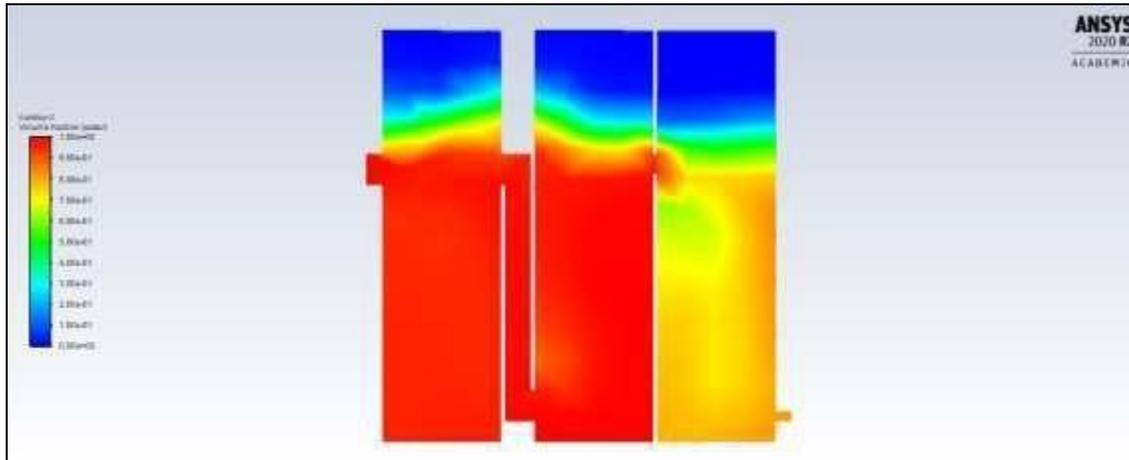
*Distribución del ARD en el Filtro Anaerobio (Llenado)*



**Nota.** Proceso del llenado del Filtro Anaerobio que compone el SITARD.

**Figura 35.**

*Distribución del ARD en el Filtro de Carbón Activado (llenado)*



**Nota.** Proceso del llenado del Filtro de Carbón Activado que compone el SITARD.

Sin embargo, las geometrías 2D, no permite obtener un estudio o evaluación hidrodinámica debido a que no se obtiene una geometría simétrica y se componen por estructura no entrizadas, es decir, que la entrada al SITARD no representan las tuberías circulares por la simetría respecto al plano, por este motivo se realiza una simulación en 3D para cada una de las unidades de tratamiento en ANSYS FLUENT, lo cual permite determinar el comportamiento hidrodinámico para todo el volumen de control, generando una evaluación con una solución más real dentro de la unidad.

Para las tres geometrías correspondientes a las unidades de tratamiento se realiza un mallado, una vez se construye dicha geometría, con el fin de generar una representación discretizada que representa las condiciones de frontera compuesta por la sección de entrada y de salida; es decir, que el proceso de mallado consiste en una representación discreta del dominio geométrico en el volumen de control, permitiendo obtener las variables (velocidad) calculadas.

Para el SITARD, se presentó una malla no estructurada debió a la complejidad de la geometría del sistema y por su flexibilidad, funcionando con métodos de volumen finito, comúnmente la geometría de las mallas en 2D son triángulos y cuadriláteros y en 3D, son tetraedros o hexaedros [75].

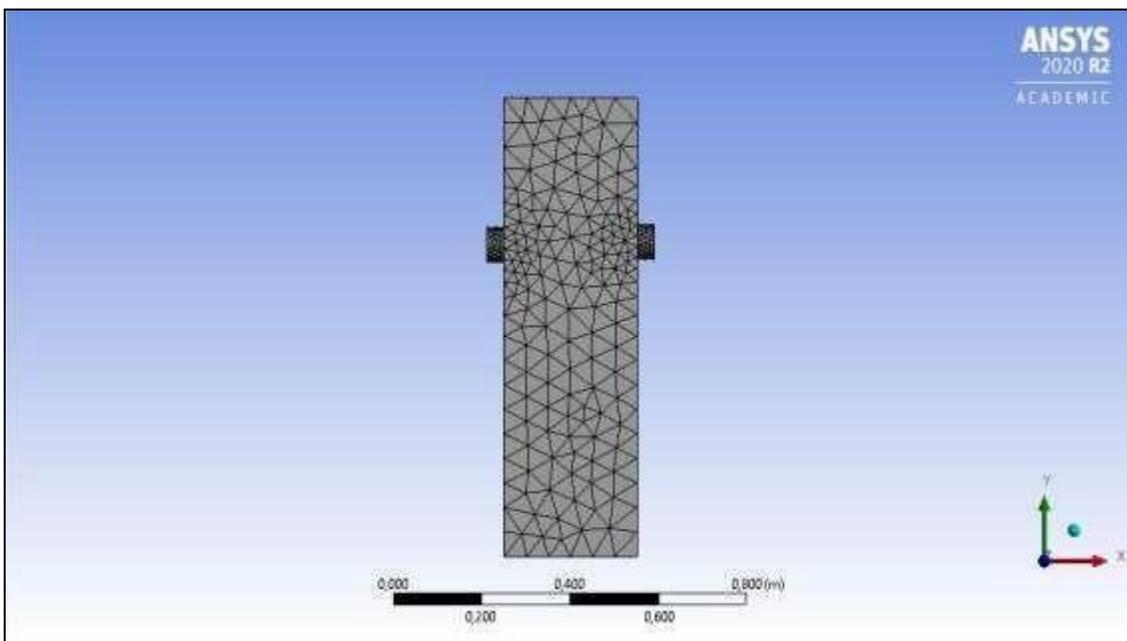
A continuación, se expresan las soluciones obtenidas en ANSYS para cada una de las unidades de tratamiento:

### 5.2.1. Evaluación hidrodinámica del Sedimentador Primario del SITARD

Al establecer la geometría del sedimentador primario, se obtiene el mallado del Sedimentador primario con el fin de establecer el volumen de control, garantizando un mejor análisis a partir de la predicción de resultados precisos, como se muestra en la **figura 36**.

**Figura 36.**

*Malla el Sedimentador Primario del SITARD*

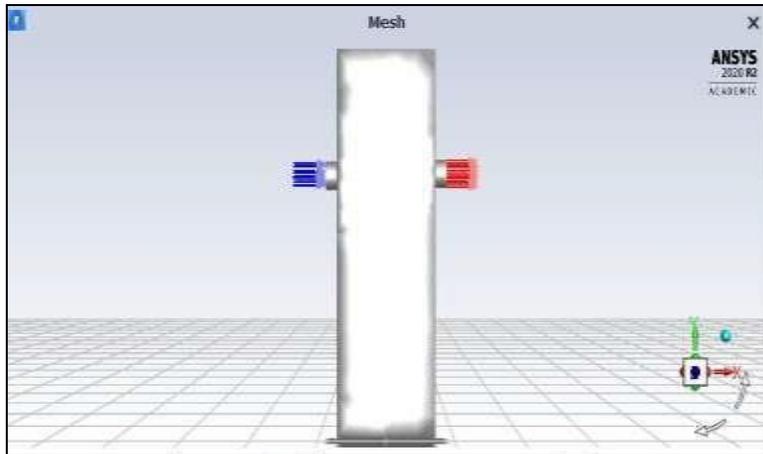


**Nota.** Proceso de mallado en el Sedimentador Primario del SITARD en ANSYS.

Una vez se determina el mallado del volumen de control, fue necesario establecer la entrada y salida del agua residual por el sedimentador, como se muestra en la **figura 37**.

**Figura 37.**

*Vectores de entrada y Salida del flujo del ARD en el Sedimentador Primario*

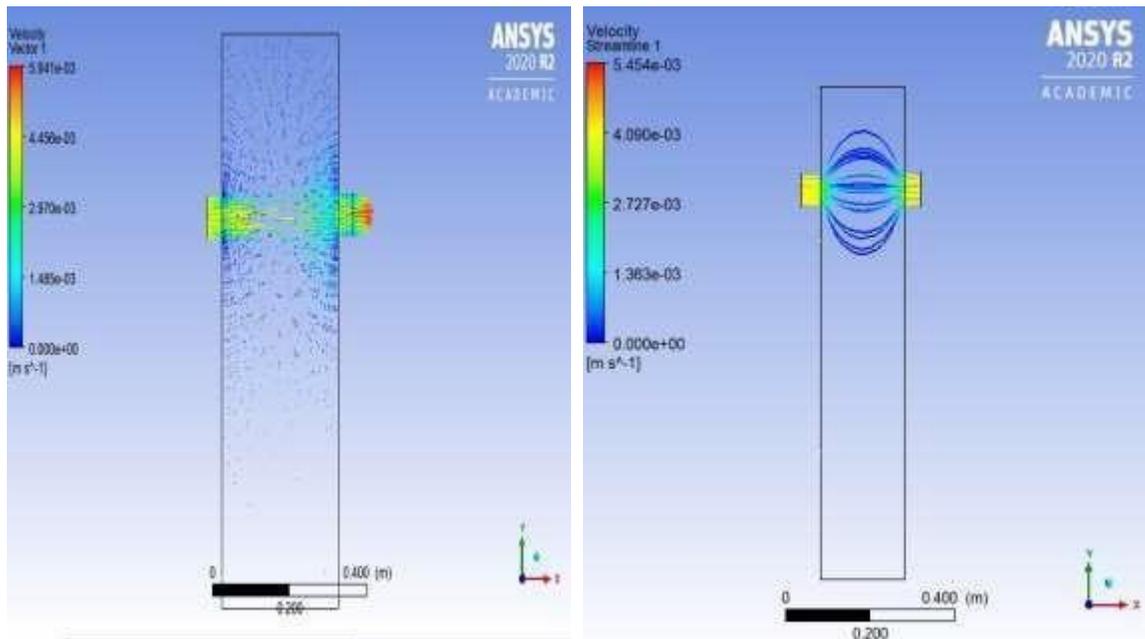


**Nota.** Delimitación de la entrada y salida del agua residual en el Sedimentador Primario del SITARD.

Al determinar las entrada y salida del agua residual en el sedimentador primario, se simula en ANSYS para evaluar el comportamiento del fluido en termino de velocidades, como se muestra en la **figura 38** y **figura 39**.

**Figura 38.**

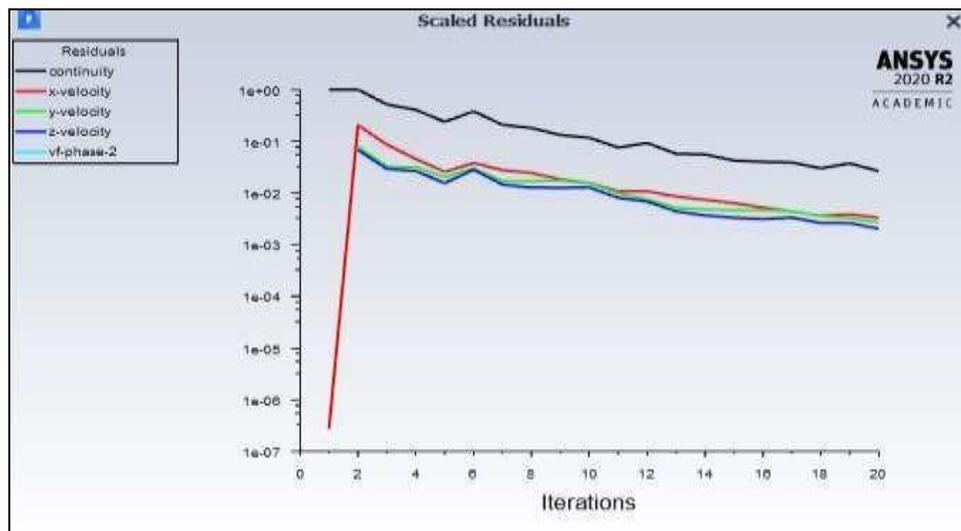
*Variación de la velocidad del ARD en el interior del Sedimentador Primario*



**Nota.** Estudio hidrodinámico a partir de la variación de la velocidad del agua residual en el interior del Sedimentador Primario del SITARD.

**Figura 39.**

*Grafica de la variación de la velocidad dentro del Sedimentador Primario*



**Nota.** Variación de la velocidad del agua residual en el Sedimentador Primario del SITARD en los ejes de la geometría 3D a partir de iteraciones en la simulación.

Al analizar las figuras anteriores, se evidencia que en el sedimentador a la entrada

y salida presenta una velocidad alta, la cual se establece, en comparación con la velocidad adquirida en la unidad de tratamiento, por lo que no favorece el proceso de sedimentación, ya que impide el ingreso o distribución uniforme del agua residual al tanque, afectando el tiempo de residencia, generando que no se presente una buena sedimentación de los sólidos, ya que para ello se requiere velocidades bajas, además en la **figura 38**, se evidencia una velocidad casi nula al fondo del sedimentador.

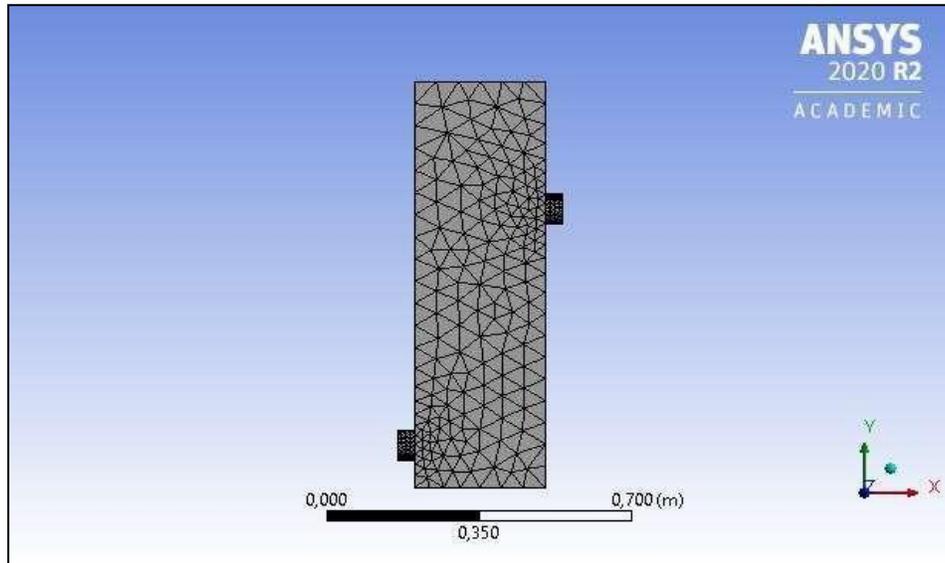
El resultado obtenido, al compararse con simulaciones de diferentes autores para el sedimentador, determina un comportamiento para el fluido de agua residual de tipo turbulento, evidenciando una velocidad superior en la entrada y salida del agua en comparación con el fondo o interior del sedimentador, lo que genera una perturbación en las velocidades a causa de la variación de la sección transversal, como se observa en la **figura 39**; esto se puede presentar debido a alteraciones en la entrada del sedimentador a causa de una velocidad excesiva del flujo en la entrada o por el tamaño excesivo en el diámetro de la entrada, generando una distribución desigual del fluido, o se puede presentar por obstrucciones en la zona de sedimentación con el ingreso de sólidos grandes no biodegradables, o distribución desigual en la salida por la mala ubicación o desnivel del vertedero creando cortocircuitos hidráulicos o zonas muertas en el sedimentador, por este motivo, a partir de la evaluación, determinan la importancia de emplear pantallas dentro del sedimentador para evitar zonas muertas o mayores perturbaciones en la velocidad del fluido a causa de la distribución desigual en agua que no permite aprovechar o utilizar grandes áreas del sedimentador [77, 78].

### ***5.2.2. Evaluación hidrodinámica del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA) del SITARD***

Al establecer la geometría del Filtro Anaerobio, se obtiene el mallado con el fin de establecer el volumen de control, garantizando un mejor análisis a partir de la predicción de resultados precisos, como se muestra en la **figura 40**.

**Figura 40.**

*Malla el Filtro Anaerobio del SITARD*

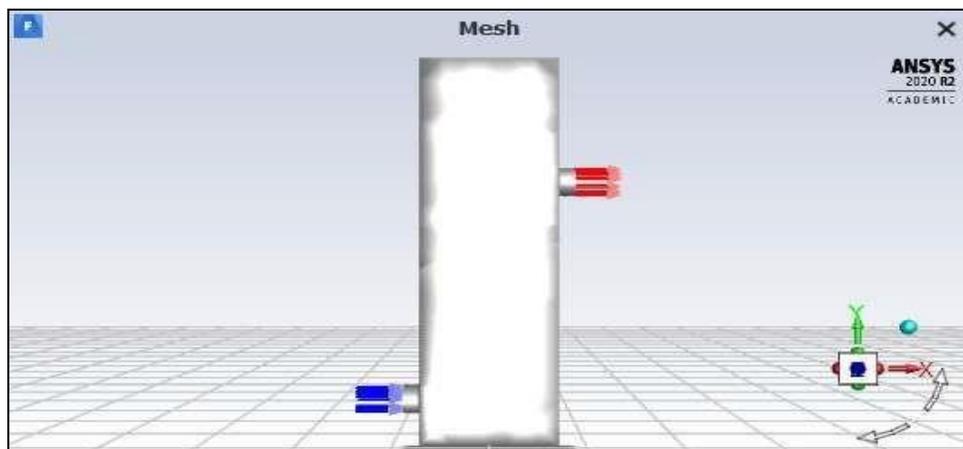


**Nota.** Proceso de mallado en el Filtro Anaerobio del SITARD en ANSYS.

Una vez se determina el mallado del volumen de control, fue necesario establecer la entrada y salida del agua residual por el filtro anaerobio, como se muestra en la **figura 41**.

**Figura 41.**

*Vectores de entrada y Salida del flujo del ARD en el Filtro Anaerobio*



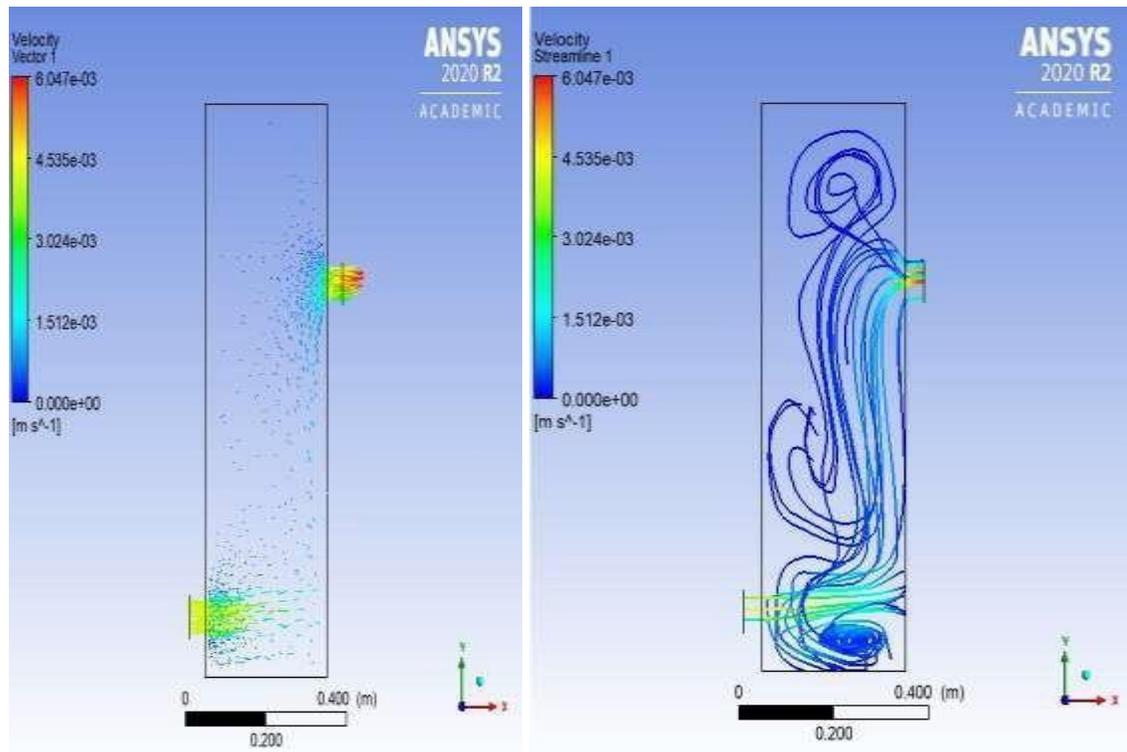
**Nota.** Delimitación de la entrada y salida del agua residual en el Filtro Anaerobio del SITARD.

Al determinar las entrada y salida del agua residual en el filtro anaerobio, se simula

en ANSYS para evaluar el comportamiento del fluido en termino de velocidades, como se muestra en la **figura 42** y **figura 43**.

**Figura 42.**

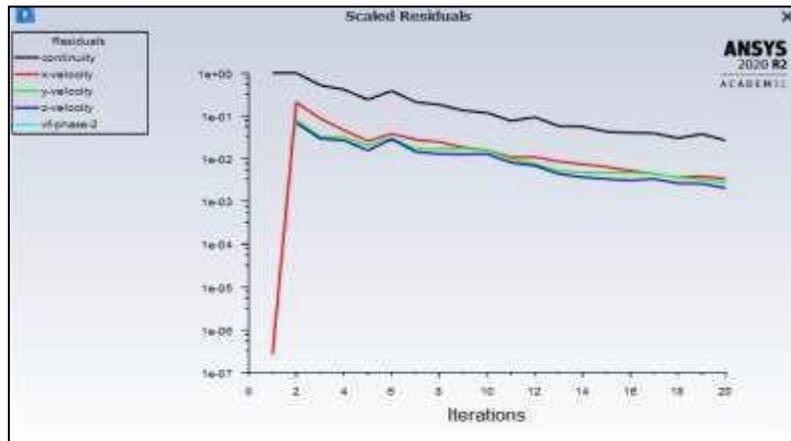
*Variación de la velocidad del ARD en el interior del Filtro Anaerobio*



**Nota.** Estudio hidrodinámico a partir de la variación de la velocidad del agua residual en el interior del Filtro Anaerobio del SITARD.

**Figura 43.**

Grafica de la variación de la velocidad dentro del Filtro Anaerobio



**Nota.** Variación de la velocidad del agua residual en el Filtro Anaerobio del SITARD en los ejes de la geometría 3D a partir de iteraciones en la simulación.

Al analizar las figuras anteriores, se evidencia que en el filtro anaerobio a la entrada y salida presenta una velocidad alta, la cual está determinada por el caudal y diámetro de la tubería, impidiendo el ingreso o distribución uniforme del agua residual al tanque, afectando el tiempo de residencia, para el caso del filtro anaerobio, es recomendable emplear una tubería con orificios que permita distribuir el agua residual en el fondo falso con una misma velocidad para que favorezca el proceso de separación o que no se genere zonas muertas dentro del tanque. Adicionalmente, se evidencia una fluctuación en la velocidad, implicando valores bajos al interior del filtro y por su comportamiento ascendente, como se muestra en la **figura 42**.

Para el filtro anaerobio, al igual que el sedimentador, se comparó con simulaciones de diferentes autores, determinando que el desempeño del filtro se ve afectado por cortos circuitos y zonas muertas a causa de corrientes cinéticas y/o de densidad que se presentan al interior, generando perturbación en las velocidades del fluido (agua residual), como se observa en la **figura 43**; Sin embargo, para la evaluación hidrodinámica del filtro, se determina como compleja, debido a las fases (líquido-gas-sólido) que se presentan por la presencia del agua residual, gas, biomasa y el medio de soporte en el filtro, adicionalmente, para la evaluación hidrodinámica, los autores emplean trazadores como colorantes o iones, que no se absorban en ninguna de las

fases, que sean estables, que no participen en reacciones dentro del filtro y con concentraciones conocidas cuando se aplique, con el fin de evaluar la concentración del trazador al pasar por toda la unidad de tratamiento en función del tiempo [79].

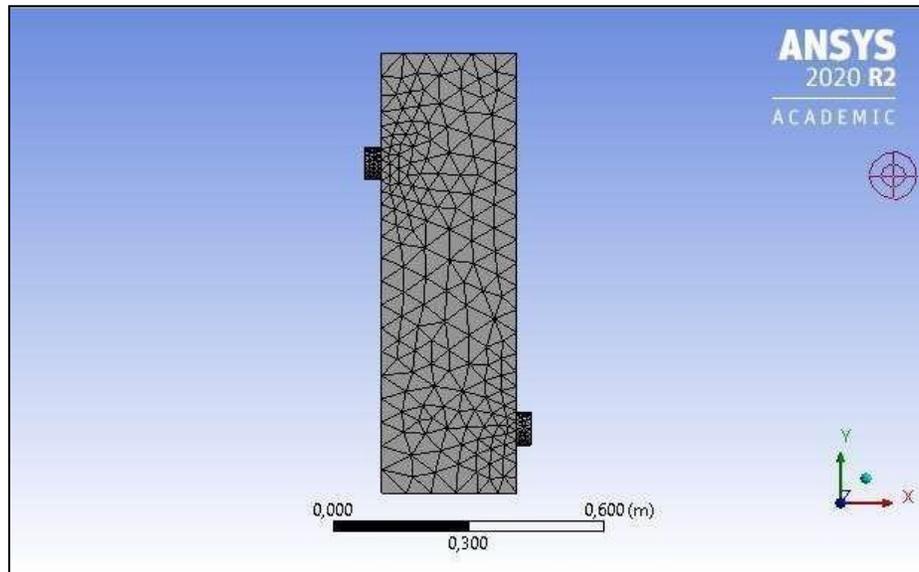
Lo mencionado anteriormente se puede presentar debido a alteraciones en la entrada a causa de una velocidad excesiva del flujo o por el tamaño excesivo en el diámetro de la entrada, generando una distribución desigual del fluido o distribución desigual en la salida por la mala ubicación o desnivel del vertedero creando cortocircuitos hidráulicos o zonas muertas en el filtro, por este motivo, a partir de la evaluación, determinan la importancia de emplear tuberías alargadas con orificios tanto en la tubería de la entrada y salida para evitar zonas muertas que generen perturbaciones en la velocidad a causa de la distribución desigual del agua concentrándose solo en sitios específicos en el medio filtrante y no en todo el volumen [79, 80].

### **5.2.3. Evaluación hidrodinámica del Filtro de carbón Activado del SITARD**

Al establecer la geometría del Filtro de Carbón Activado, se obtiene el mallado con el fin de establecer el volumen de control, garantizando un mejor análisis a partir de la predicción de resultados precisos, como se muestra en la **figura 44**.

**Figura 44.**

*Malla el Filtro de Carbón Activado del SITARD*

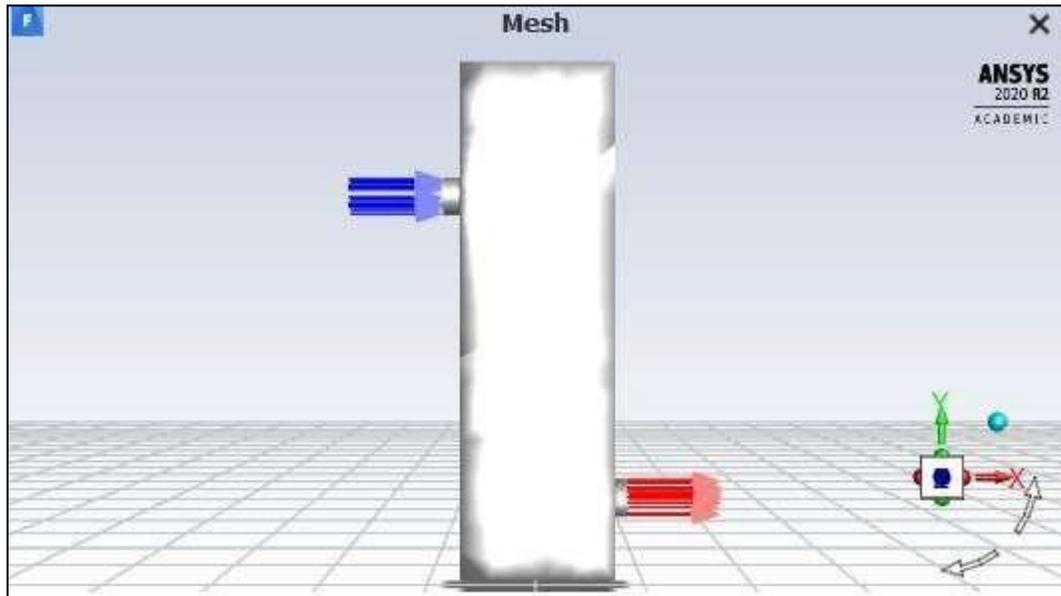


**Nota.** Proceso de mallado en el Filtro de Carbón Activado del SITARD en ANSYS.

Una vez se determina el mallado del volumen de control, fue necesario establecer la entrada y salida del agua residual por el filtro de carbón, como se muestra en la **figura 45**.

**Figura 45.**

Vectores de entrada y Salida del flujo del ARD en el Filtro de Carbón Activado

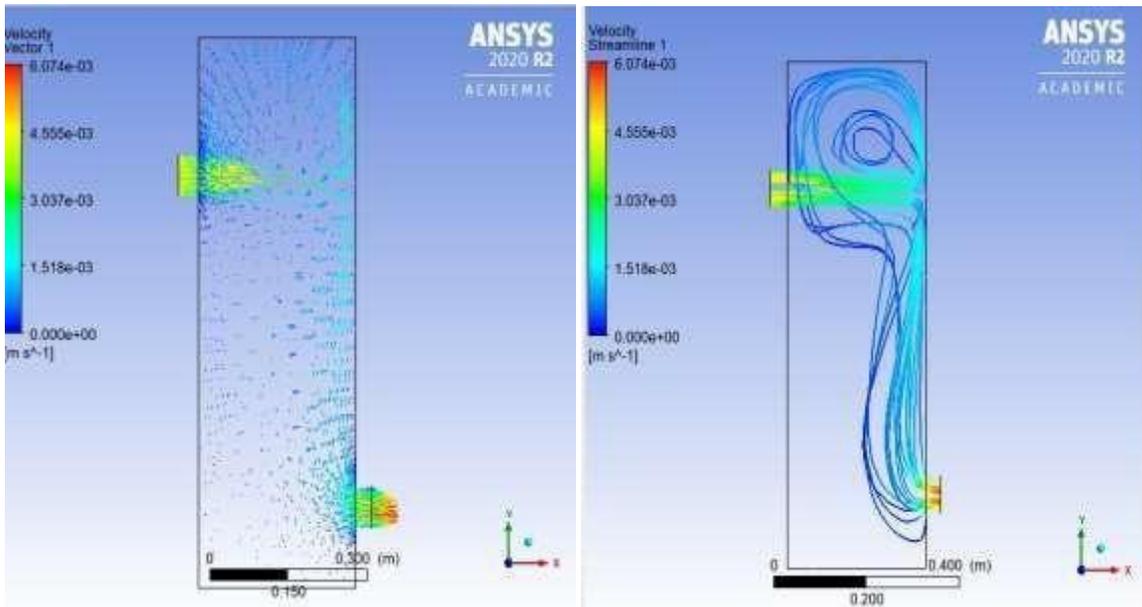


**Nota.** Delimitación de la entra y salida del agua residual en el Filtro de Carbón Activado del SITARD.

Al determinar las entrada y salida del agua residual en el filtro del carbón activado, se simula en ANSYS para evaluar el comportamiento del fluido en término de la variación de la velocidad, como se muestra en la **figura 46** y **figura 47**.

**Figura 46.**

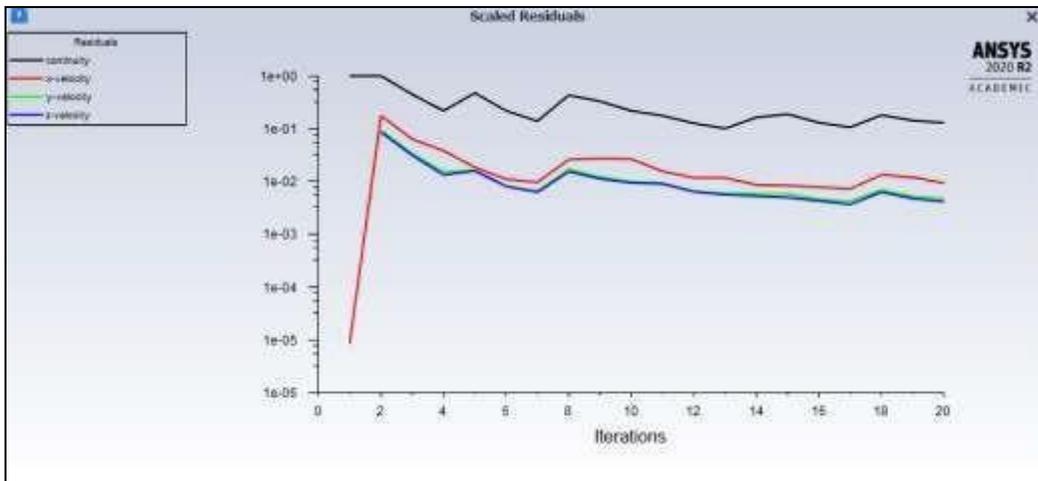
*Variación de la velocidad del ARD en el interior del Filtro de Carbón Activado*



**Nota.** Estudio hidrodinámico a partir de la variación de la velocidad del agua residual en el interior del Filtro de Carbón Activado del SITARD.

**Figura 47.**

*Grafica de la variación de la velocidad dentro del Filtro de Carbón Activado*



**Nota.** Variación de la velocidad del agua residual en el Filtro de Carbón Activado del SITARD en los ejes de la geometría 3D a partir de iteraciones en la simulación.

Al analizar las figuras anteriores, al igual que en el filtro anaerobio, se evidencia que en la entrada y salida se presenta una velocidad alta, la cual esta determinada, impidiendo una distribución uniforme del agua residual en el tanque, lo que se comprueba con la trayectoria y fluctuación de la velocidad en el interior en la **figura 46**; para el caso del filtro, es recomendable emplear una tubería con orificios que permita distribuir el agua residual en el borde libre con una misma velocidad para que favorezca el proceso de separación o que no se genere zonas muertas dentro del tanque.

Para el filtro de carbón activado, la velocidad es determinada por el transporte de masa en la película de líquido que rodea al granulo de carbón activado, que se ve afectada por una distribución desigual del fluido generando zonas muertas en el filtro, por este motivo, a partir de la evaluación, determinan la importancia de emplear tuberías alargadas con orificios tanto en la tubería de la entrada y salida para evitar zonas muertas que generen perturbaciones en la velocidad a causa de la distribución desigual del agua concentrándose solo en sitios específicos en el medio filtrante y no en todo el volumen, Adicionalmente, de la adecuación del filtro para el retro lavado, ya que las obstrucciones en el medio filtrante alteran el paso del fluido [81].

A partir de la evaluación hidrodinámica e información bibliográfica, el Sistema Individual de Tratamiento de Agua Residual Doméstica puede ser adecuado con pantallas en el sedimentador o tuberías con orificios en los filtros que mejoren la eficiencia hidrodinámica evitando zonas muertas dentro del sistema que pueden afectar la remoción de la carga contaminante del agua residual.

## CONCLUSIONES

De acuerdo con el desarrollo el presente proyecto de grado se concluye que:

El vertimiento generado por una unidad habitacional integrada por 4 personas en la zona rural no cumple con los valores máximos permisibles (niveles de aceptación) determinados en la Resolución 0631 de 2015 para los parámetros de SST, DQO, DBO y Aceites y Grasa con valores de 200 mg/L, 233 mg/L, 500 mg/L y 100 mg/L, respectivamente.

Para la alternativa del diseño del Sistema Individual de Tratamiento de Agua Residual Doméstica (SITARD), se seleccionó un sedimentador primario, filtro anaerobio de flujo ascendente y un filtro de carbón activado granular para la conformación del tren de tratamiento debido a su viabilidad en términos de aspectos económicos, técnicos, ambientales sociales, siendo las mejores alternativas.

Se determinó que el Sistema Individual de Tratamiento de Agua Residual Doméstica (SITARD), al incorporar las tres unidades de tratamiento seleccionadas (un sedimentador primario, filtro anaerobio de flujo ascendente y un filtro de carbón activado granular) como un tratamiento compacto o integro puede lograr una eficiencia global teórica de 93% de SST, 88% de DBO y 95% de DQO.

A partir de la evaluación hidrodinámica, se evidencia una fluctuación en la velocidad del fluido (agua residual domestica) en el interior de los tanques de las unidades de tratamiento, que demuestran que el fluido presenta velocidad bajas o casi nulas en zonas específicas, que pueden afectar el proceso de sedimentación o generar zonas muertas en los filtros en el proceso de su implementación, lo que puede llegar a afectar el rendimiento en la remoción de contaminantes.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Delgado, et. al, “*Gestión del agua en comunidades rurales; caso de estudios Cuenca del Río Guayuriba, Meta-Colombia*”, Luna Azul., no. 45, pp.50-70, julio-diciembre, 2017.
- [2] J. Silva, P. Torres y C. Madera, “*Reuso de aguas residuales domésticas en agricultura. Una revisión*” Agronomía., vol. 26, no. 2, pp. 347-359, octubre, 2008.
- [3] J. Rodríguez, C. García y J. García, “*Enfermedades transmitidas por el agua y saneamiento básico en Colombia*” Rev. Salud pública, vol. 18, no. 5, pp. 738-745, octubre, 2016.
- [4] H. Pedrozo, *Evaluación para la construcción de sistemas sépticos caso: Campo Casabe*, Monografía. Facultad de Ingeniería, Universidad Pontificia Bolivariana, Floridablanca, 2011.
- [5] N. Alasino, *Síntesis y diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales*, tesis doct. Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional Del Litoral, Santa Fe, Argentina, 2009.
- [6] I. Chávez-Vera, “*Diseño e implementación de un sistema de tratamiento de Aguas residuales*”, Dom. Cien., vol. 3, no. 1, pp. 536-560, junio, 2017.
- [7] J. M. Lizarazo y M. I. Orjuela, *Sistemas de plantas de tratamiento de aguas residuales en Colombia*, tesis esp. Facultad de Medicina, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2013.
- [8] H. S. Díaz y J. Caballero, *Simulación de una planta de tratamiento de aguas residuales y su análisis técnico- económico-ambiental en la ciudad de Iquitos mediante el uso de Super pro Designer V6-2015*, tesis pre., Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional de La Amazonia Peruana, 2015.
- [9] G. Zumelzu. *Ampliación de la EDAR de Musxiz (Bizkala), para la reutilización industrial del agua tratada*, trabajo fin de grado. Escuela de Ingeniería de Bilbao, Universidad del País Vasco, 2018.

- [10] S. Jiménez, *Tratamiento terciario mediante UF+OI de aguas depuradas de una PTAR en el proceso industrial de fabricación de concreto para su reutilización*, tesis mast., Departamento de Ingeniería Química y Nuclear, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2017.
- [11] J. Brenes, *Diseño del proceso de tratamiento terciario de ozonización del agua de salida de una E.D.A.R convencional para su reutilización en el riego de campos de golf*, tesis pre. Facultad Ciencias, Universidad de Cádiz, 2006.
- [12] D. J. Morán, *Diseño de planta de tratamiento de aguas residuales para el municipio de San Juan Chamelco, Alta Verapaz*, tesis pre., Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas, Universidad Rafael Landívar, Guatemala de la Asunción, 2014.
- [13] A. Noyola, J. M. Morgan-Sagastume y L. P. Gûereca. *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales*, 1a ed. México: Universidad Nacional Autónoma de México - Instituto de Ingeniería, 2013.
- [14] A. Fernández, "El agua: un recurso esencial," *Química Viva*, vol. 11, pp. 147-170, diciembre, 2012.
- [15] B. L. Guzmán, G. Nava y P. Díaz, "La calidad del agua para consumo humano y su asociación con la morbilidad de Colombia, 2008-2012," *Biomédica*, vol. 35, pp. 177-190, 2015.
- [16] J. F. Rojas, V. L. Robayo y D. C. Córdoba, "Calidad del Agua: Normatividad – Reporte de Información al SUI – Diagnóstico nacional," Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2ª ed. 2017.
- [17] MINISTERIO DE SALUD Y PROTECCIÓN SOCIAL, "Informe Nacional de la Calidad del Agua para Consumo Humano – INCA 2017," MINISTERIO DE SALUD Y PROTECCIÓN SOCIAL, 2019.
- [18] Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, "Consulta Diagnóstico e Identificación de Problemas, Objetivos y Alternativas 2019: Documento

*de Avance de Análisis de Impacto Normativo,*” Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, 2019.

[19] DPN, CONPES 3918, *ESTRATEGIA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLES (ODS) EN COLOMBIA,* Departamento Nacional de Planeación, Bogotá, 2018.

[20] G. Ibarra, A. Laguna y J. Rojano, “*Análisis de la inclusión del cambio climático y el crecimiento verde en la regulación general*”, Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, Minvivienda, 2018.

[21] G. Ibarra, et al, “*Diagnostico e identificación de problemas y objetivos, evaluación y selección de la mejor alterativa*”. *AIN, Regulación e esquemas diferenciales urbanos para los servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado y aseo,* Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, Minvivienda, 2018.

[22] MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO, “*Plan Director de Agua y Saneamiento Básico: Visión Estratégica 2018-2030,*” MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO, 2018.

[23] INS “*Boletín de vigilancia de la calidad del agua para consumo humano,*” INSTITUTO NACIONAL DE SALUD, 2020.

[24] D. M. Castillo, et al, “*Estudio sectorial de los servicios públicos domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado 2018,*” Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2019.

[25] Resolución 0631, MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, 2015.

[26] D. A. Zambrano, *Minimización y Prevención como estrategia para el control de la contaminación por aguas residuales municipales en la zona expansión de Cali,* Trabajo de Investigación. Facultad de Ingeniería, Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad del Valle, Santiago de Cali, 2010.

[27] J. A. Romero. *Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y principios de diseño.*

3ª ed. Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2004.

- [28] J. F. Morales, *Reutilización y aprovechamiento de aguas residuales domésticas tratadas en Colombia*, Monografía. Programa de Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Pradera, 2018.
- [29] E. Díaz, A. Alvarado y K. Camacho, “*El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México*,” *Quivera*, vol. 14, pp. 78-97, enero-junio, 2012.
- [30] S. Aguilar y G.A. Solano, *Evaluación del impacto por vertimientos de aguas residuales domésticas, mediante la aplicación del índice de contaminación (ICOMO) en Caño Grande, localizado en Villavicencio-Meta*, Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Santo Tomás, Villavicencio, Colombia, 2018.
- [31] E. R. Márquez, *Alternativas de recolección y tratamiento de aguas residuales domésticas para pequeñas comunidades en el departamento de sucre*, Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Sucre, Sincelejo, Sucre, 2008.
- [32] UNESCO, “*Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017: Aguas Residuales El recurso Desaprovechado*” UNESCO, 2017.
- [33] J. Torres y V. Briceño, *Tratamiento de Aguas Residuales de Tipo Doméstico a partir de Coleópteros Scarabaeidae*, Trabajo de grado. Programa de Ingeniería Ambiental, Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD), Garagoa, Boyacá, 2016.
- [34] M. F. Revelo, *Análisis de la eficiencia de la planta de tratamiento con procesos biológicos de aguas residuales provenientes de descargas domésticas de Puéllaro*, Tesis. Facultad de ciencias de la ingeniería y manejo de riesgos naturales, Universidad Tecnológica Equinoccial, Quito, 2017.

- [35] J. Gómez y R. Manzour, *Propuesta de diseño de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas de tipo modular, para una vivienda unifamiliar rural*, Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad Católica Andrés Bello, 2013.
- [36] B. Wills. et al, “*Propuesta Metodológica para la evaluación de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas en el sitio de origen,*” Revista EIA, No. 13, pp. 93-105, julio, 2010.
- [37] P. Moncaleano y M. Ramírez, *Diseño de un sistema de tratamiento y reutilización de aguas grises producidas en la finca “El Porvenir 2” El Espinal – Tolima*, Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad El Bosque, Bogotá, 2019.
- [38] J. López, *Tratamiento de Aguas Residuales Aplicación de Humedales Artificiales*, Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F., 2015.
- [39] DANE, “CENSO NACIONAL AGROPECUARIO: Tercera entrega de resultados 2014,” DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística), 2014.
- [40] P. Gutiérrez, *Herramienta de Selección de Tecnologías de Tratamiento de Aguas Residuales basada en Modelos de Decisión Multicriterio Caso de Estudio: Municipio de Colombia*, Tesis maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, 2017.
- [41] Y. Giraldo, *Propuesta de tratamiento para el agua residual generada en la empresa soluciones nutritivas*, Modalidad pasantía, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Occidente, Santiago de Cali, 2020.
- [42] M. Leal, “*Tecnologías convencionales de tratamiento de agua y sus limitaciones. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua*”. Solar Safe Water. pp. 63-72.
- [43] A. Urrusuno, *Diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales para la depuración de efluentes procedentes de un lavadero de carbón*, Trabajo Fin de Máster. Escuela de Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo, Universidad de Oviedo, Oviedo, 2017.

- [44] J. Oviedo, W. Pereira y C, Vitola, *Evaluación técnica del sistema de tratamiento de aguas residuales de la primera brigada en infantería marina BRIM – 1*, Trabajo de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad de Sucre, Sincelejo, 2007.
- [45] J. Maroto, *Diseño de un sistema de tratamiento del agua residual de la lavandería splendid-riobamba*, Tesis pre. Facultad de Ciencias, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 2013.
- [46] R. Fernández, *Sedimentación/Aguas*, Escuela de Organización industrial, 2015-2016.
- [47] CONAGUA (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA), *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento - Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Pretratamiento y tratamiento primario*, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- [48] L. Faba, *Diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales para la depuración de efluentes procedentes de un lavadero de carbón activado*, Trabajo Fin de Máster. Escuela de Ingeniería de Minas, Energía y Materiales de Oviedo, Universidad de Oviedo, Oviedo, 2017.
- [49] D. Morán, *Diseño de planta de tratamiento de aguas residuales para el municipio de San Juan Chamelco, Alta Verapaz*, Tesis de grado. Facultad de ciencias ambientales y agrícolas, Universidad Rafael Landívar, Guatemala de la Asunción, 2014.
- [50] OPS (Organización Panamericana de la Salud), *Guía para el diseño de tanques sépticos, tanques Imhoff y Lagunas de estabilización*, 2005.
- [51] MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO, “*Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento básico RAS – 2000: Sección II Título E Tratamiento de Aguas Residuales*,” MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO, 2000.
- [52] Y. Batero y E. Milena, *Evaluación de filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFAs) con medio de soporte en guadua para remoción de materia de materia*

- orgánica de un agua residual sintética*, Trabajo de Grado. Facultad de Tecnologías, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, 2007.
- [53] D. Félix y D. Rikeros, *Diseño del sistema de tratamiento de aguas residuales generadas en el Cantón Durán*, Trabajo de Grado. Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Escuela Superior Politécnica de Litoral , Guayaquil, 2015.
- [54] E. Padilla, *Evaluación de un filtro anaerobio de flujo ascendente para tratar agua residual de rastro*, Tesis pre. Centro de investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A. C., Guadalajara, 2010.
- [55] A, Prieto y V, Velásquez, *Diseño, Construcción y Evaluación de un reactor de filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA) a nivel de Laboratorio para el tratamiento de agua residual doméstica*, Tesis pre. Facultad de Ingeniería de Procesos, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, 2018.
- [56] L, Pinzón y O, Almeida, *Diseño, Construcción y puesta en marcha de un modelo de tratamiento para las aguas residuales generadas en la producción de panela*. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Bucaramanga, 2010.
- [57] CONAGUA (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA), *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento – Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Filtros Anaerobios de Flujo Ascendente*, México: Secretariade Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- [58] J. Pabón, et al, “*La atmosfera, el tiempo y el clima*”, El Medio Ambiente En Colombia, IDEAM, pp. 34 – 91, 2001.
- [59] A. Alvarado, *Evaluación de materiales de desecho como medio filtrante en filtros anaerobios de flujo ascendente*, Informe de Proyecto Final. Escuela de Química, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, 2011.
- [60] L. Visbal y A. Roza, *Diseño de un Sistema de Filtración Continua Arena – Carbón Activado como herramienta Didáctica en el Laboratorio de Operaciones Unitarias*, Facultad de Ingeniera, Universidad de San Buenaventura, 2018.

- [61] A. Blaga, *Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales superficiales para su posterior alimentación a caldera*, Trabajo de Fin de Grado. Escuela superior de tecnología y ciencias experimentales, Universitat Jaume-I, Castellón, 2019.
- [62] M. Requena, *Diseño de un sistema combinado de carbón activado y reactor biológico secuencial para eliminación de compuestos farmacéuticos presentes en aguas urbanas*, Trabajo de Fin de Grado. Escuela Técnica Superior Ingenieros Industriales Valencia, Universitat Politècnica de València, 2017-18.
- [63] P. Ures, A. Jácome y J. Suarez, *Adsorción en carbón activado*, Inditex, Universidad de Coruña, 2014.
- [64] J. Ramírez, O. Martínez y L. Fernández, “*Remoción de contaminantes en aguas residuales industriales empleando carbón activado de pino pátula*”, *Avances en investigación en ingeniería*, vol.10, no.1, pp. 42-49, junio, 2013.
- [65] I. Ávila y M. Moreno, *Diseño, propuesta e implementación de un filtro para tratamiento de aguas de uso doméstico en tanques de reserva en la población del casco urbano de la inspección de San Antonio de Anapoima*, Especialización en Gerencia Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad Libre, Bogotá, 2016.
- [66] J. Arana, *Evaluación de la aplicación de carbón activado granular en la filtración del agua clarificada del río Cauca*, trabajo de grado. Facultad de ingeniería, Universidad del Valle, Santiago de Cali, 2016.
- [67] OPS (Organismos panamericana de la salud), *Guía para diseño de sistemas de tratamiento de filtración en múltiples etapas*, lima, 2015
- [68] L. Bonilla, *Tratamiento de aguas residuales de textilería utilizando carbón activado*, 1ra edición, 2017, COMPAS, Guayaquil – Ecuador.
- [69] MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, “*Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento básico RAS: Título J: Alternativas tecnológicas en Agua y Saneamiento para el Sector Rural*,” MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, 2010.

- [70] C. Carreón, S. Ahumada y E. Ramírez, *Avances en Investigación Ambiental en la UABC, Conociendo Nuestro Ambiente 2016*, Universidad Autónoma de Baja California, México, 2016.
- [71] CONAGUA (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA), *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento – Introducción Al Tratamiento De Aguas Residuales Municipales*, México: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- [72] CONAGUA (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA), *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento – Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Reactores Anaerobios de Flujo Ascendente*, México: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- [73] M. Varnero, *Manual de Biogás*, Santiago de Chile: MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, 2011.
- [74] J. García, et al. “*Criterios hidrodinámicos para el diseño de sistemas de recircularon en acuicultura, Tecnología y Ciencias del Agua*”, vol. 5, no, 5, pp. 63-78,septiembre-octubre, 2014.
- [75] M. Cárdenas y G. Fernando, *Aplicación de la Dinámica de Fluido Computacional (CFD) y el Modelado Mecánico en el Estudio del Sistema de bombeo Electro centrífugo Sumergido (BEC)*, tesis, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional autónoma de México, México, 2017.
- [76] D. Hincapié, *Cinética e Hidrodinámica aplicadas, en condiciones ambientales locales, a humedales de flujo subsuperficial a escala piloto*, trabajo de grado, Facultad de Tecnología, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, 2007.
- [77] M. Ortega, *Estudio hidrodinámico de los parámetros de diseño en sedimentadores de flujo horizontal empleados en pequeñas plantas de tratamiento de residuales*, trabajo de diploma, Facultad de Ingeniería hidráulica, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, 2016.

- [78] A. Ordoñez, *Evaluación de un sedimentado de alta tasa con un modelo de dinámica de fluidos computacional (DFC)*, tesis maestría. Programa de maestría y doctorado en ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2015.
- [79] A. Pérez y P. Torres, “*Evaluación del comportamiento hidrodinámico como herramienta para optimización de reactores anaerobios de crecimiento en medio fijo*”, rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia, no. 45, pp. 27-40, septiembre, 2008.
- [80] A. Perez, P. Torres y J. Silva, “*Tratamiento anaerobio de las aguas residuales del proceso de extracción de almidos de yuca, optimización de variables ambientales y operacionales*”, *Dyna*, vol.76, no.160, pp. 139-148, diciembre, 2009,
- [81] P. Navarro, C. Vargas. “*Efecto de las propiedades físicas del carbón activado en la adsorción de oro medio cianuro*”, *Revista metalúrgica*. vol.46, no.3, pp. 227-239, mayo-junio, 2010.
- [82] Manual Estructuración de Trabajos de Grado. Fundación Universidad de América, Bogotá, 2021

# **ANEXOS**

## ANEXO 1.

### CONCENTRACIÓN DE SST, DBO Y DQO A PARTIR DE LA CARGA PROMEDIO

Para el cálculo de la carga promedio de SST, DBO y DQO, se aplica la **ecuación 1**, a partir de los datos de la **tabla 25**.

**Ecuación 1.** Concentración de carga promedio

$$\text{Concentracion}_i = \frac{CP_i * \text{No. de Habitantes}}{Q}$$

- **Sólidos Suspendidos Totales (SST)**

$$\text{Concentracion}_{SST} = \frac{25 \frac{g}{c \cdot d} * 4 c (\text{contribuyentes})}{400 \frac{L}{c \cdot d} * 4 c (\text{contribuyentes})} * \frac{1000 g}{1 g} = 167 \frac{mg}{L}$$

$$\text{Concentracion}_{SST} = \frac{30 \frac{g}{c \cdot d} * 4 c (\text{contribuyentes})}{400 \frac{L}{c \cdot d} * 4 c (\text{contribuyentes})} * \frac{1000 g}{1 g} = 200 \frac{mg}{L}$$

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)**

$$\text{Concentracion}_{DBO} = \frac{30 \frac{g}{c \cdot d} * 4 c (\text{contribuyentes})}{400 \frac{L}{c \cdot d} * 4 c (\text{contribuyentes})} * \frac{1000 g}{1 g} = 200 \frac{mg}{L}$$

$$\text{Concentracion}_{DBO} = \frac{35 \frac{g}{c \cdot d} * 4 c (\text{contribuyentes})}{400 \frac{L}{c \cdot d} * 4 c (\text{contribuyentes})} * \frac{1000 g}{1 g} = 233 \frac{mg}{L}$$

- **Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

$$\text{Concentracion}_{DQO} = \frac{75 \frac{g}{c \cdot d} * 4 c (\text{contribuyentes})}{400 \frac{L}{c \cdot d} * 4 c (\text{contribuyentes})} * \frac{1000 g}{1 g} = 500 \frac{mg}{L}$$

$$\text{Concentracion}_{DQO} = \frac{80 \frac{g}{c \cdot d} * 4 c (\text{contribuyentes})}{400 \frac{L}{c \cdot d} * 4 c (\text{contribuyentes})} * \frac{1000 g}{1 g} = 533 \frac{mg}{L}$$

## ANEXO 2.

### DESARROLLO DE LAS ECUACIONES DE DISEÑO DEL DIMENSIONAMIENTO DEL SEDIMENTADOR

Para el cálculo del dimensionamiento del sedimentador se toma en cuenta el caudal generado por la unidad habitacional (1600 L/d) y los valores de carga superficial de la **tabla 36**.

#### a. Cálculo del área del sedimentador

**Ecuación 2.** Área del sedimentador en función de la carga superficial promedio

$$A_s = \frac{Q}{CHS_{prom}}$$
$$Q = 1600 \frac{L}{d} * \frac{1 m^3}{1000 L} = 1,6 m^3/d$$
$$A_s = \frac{1,6 m^3/d}{32 m^3/m^2 d} = 0,050 m^2$$

**Ecuación 3.** Área del sedimentador en función de la carga superficial pico

$$A_s = \frac{Q * t_{pico}}{CHS_{pico}}$$

Para el tiempo del caudal pico, se toma en cuenta el diseño propuesto en el antecedente 1 (Propuesta de diseño 1), en el cual establece un tiempo para el caudal pico de tres horas, lo que equivale a:

$$A_s = \frac{1,6 m^3/d * 3}{80 m^3/m^2 d} = 0,060 m^2$$

**Ecuación 4.** Área del sedimentador en función de su dimensión

$$A_s = a_s * l_s$$

Conociendo que el área del sedimentador es 0,060 m<sup>2</sup> y que la relación longitud:ancho entre 1.5:1, se calcula el ancho y longitud del sedimentador.

$$A_s = a_s * l_s = a_s * 1,5 a_s = 1,5 a_s^2$$

$$0,06 \text{ m}^2 = 1,5 a_s^2$$

Se despeja el ancho del sedimentador:

$$a_s = \sqrt{\frac{0,06 \text{ m}^2}{1,5}} = 0,20 \text{ m}$$

Al obtener el valor del sedimentador, se calcula la longitud del sedimentador:

$$l_s = 1,5 a_s = 1,5 (0,20 \text{ m}) = 0,30 \text{ m}$$

**b. Cálculo del volumen del sedimentador**

Al conocer el ancho y longitud del sedimentador, se establece por criterio de los autores, una profundidad de 1 m, de este modo, al obtener estos valores, se obtiene el volumen del sedimentador.

**Ecuación 5.** Volumen del sedimentador en función de su dimensión

$$V_s = a_s * l_s * h_s$$

$$V_s = 0,20 \text{ m} * 0,30 \text{ m} * 1 \text{ m} = 0,060 \text{ m}^3$$

**c. Cálculo de la carga superficial**

Al conocer los valores del caudal y el volumen del sedimentador se puede determinar el tiempo de retención.

**Ecuación 6.** Tiempo de residencia hidráulica del sedimentador en función de su dimensión

$$THR_s = \frac{V_s}{Q}$$

$$THR_s = \frac{0,06 \text{ m}^3}{1,6 \text{ m}^3/d} = 0,0375 \text{ d} = 0,9 \text{ h} \cong 1 \text{ h}$$

### ANEXO 3.

## DESARROLLO DE LAS ECUACIONES DE DISEÑO DEL REACTOR ANAEROBIO DE FLUJO ASCENDENTE (RAFA)

Para el cálculo del dimensionamiento del FAFA se toma en cuenta el caudal generado por la unidad habitacional (1600 L/d) y los valores obtenidos del dimensionamiento del sedimentador en la **tabla 37**.

#### a. Cálculo del área del Filtro Anaerobio

Se asume el área del filtro anaerobio igual a la del sedimentador debido al diseño de una unidad compacta, para así tener la misma longitud y ancho.

**Ecuación 7.** Área del filtro anaerobio en función de la longitud y ancho

$$A_{FAFA} = a_{FAFA} * l_{FAFA}$$

$$A_{FAFA} = A_s = 0,20 \text{ m} * 0,30 \text{ m} = 0,060 \text{ m}^2$$

#### b. Cálculo del volumen del Filtro Anaerobio

Para el diseño de la unidad compacta, la profundidad del filtro anaerobio se dimensiona igual a la del sedimentador primario.

**Ecuación 8.** Volumen total del FAFD

$$V_{TFAPA} = A_{FAFA} * h_{TFAPA}$$

$$V_{TFAPA} = A_{FAFA} * h_{TFAPA} = A_s * h_s = 0,06 \text{ m}^2 * 1 \text{ m} = 0,060 \text{ m}^3$$

Adicionalmente se Comprueba las restricciones establecidas por el RAS 2000:

- $\text{base} \leq \text{largo} \leq 3$  la base: ancho o base (0,20 m) es menor que el largo o longitud (0,30 m), lo cual a su vez es menor a 3 veces la base (0,60 m).
- $0,60 \text{ m} \leq \text{altura del filtro} \leq 1,80 \text{ m}$ : Al seleccionar una altura de 1 m, se cumple con la restricción.

- largo  $\leq 2$  la altura del filtro: el largo o longitud del filtro (0,30 m), cumple con la restricción de ser menor a 2 veces la altura del filtro (2 m).

c. Cálculo de la carga hidráulica volumétrica

**Ecuación 9.** Carga Hidráulica del FAFA en función del caudal y el área

$$CHS_{FAFA} = \frac{Q}{A_{FAFA}}$$

$$CHS_{FAFA} = \frac{1,6 \text{ m}^3/d}{0,060 \text{ m}^2} = 26,6667 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ d}$$

a. Cálculo del lecho filtrante

**Ecuación 10.** Profundidad total del FAFA

$$h_{TFAPA} = h_{lf} + h_{bl} + h_{ff}$$

Para el altura o profundidad del medio filtrante, se tiene en cuenta el medio filtrante ocupa entre el 50 a 70% de la profundidad total y el fondo falso, debe tener un 15% de la profundidad total:

$$h_{lf} = 0,5 h_{TFAPA} = 0,5 * 1 \text{ m} = 0,5 \text{ m}$$

$$h_{ff} = 0,15 h_{TFAPA} = 0,15 * 1 \text{ m} = 0,15 \text{ m}$$

Así de esta manera se calcula el bode libre que se deja en la parte superior del filtro:

$$h_{bl} = h_{TFAPA} - h_{lf} - h_{ff} = 1 \text{ m} - 0,5 \text{ m} - 0,15 \text{ m} = 0,35 \text{ m}$$

Al conocer la altura del medio filtrante, se determina el volumen de dicho medio.

**Ecuación 11.** Volumen del lecho filtrante

$$V_{lf} = A_{FAFA} * h_{lf}$$

$$V_{lf} = 0,06 \text{ m}^2 * 0,50 \text{ m} = 0.030 \text{ m}^3$$

**b. Cálculo del tiempo de retención hidráulico**

**Ecuación 12.** Tiempo de residencia hidráulica del FAFD

$$THR_{FAFA} = \frac{V_{lf}}{Q}$$

$$THR_{FAFA} = \frac{0,030 \text{ m}^3}{1,6 \text{ m}^3/\text{d}} = 0,0188 \text{ d} = ,45 \text{ h}$$

## ANEXO 4.

### DESARROLLO DE LAS ECUACIONES DE DISEÑO DEL FILTRO DE CARBÓN ACTIVADO GRANULAR

Para el cálculo del dimensionamiento del filtro se toma en cuenta el caudal generado por la unidad habitacional (1600 L/d) y los valores obtenidos del dimensionamiento del sedimentador en la **tabla 37**.

#### a. Cálculo del área del Filtro

Se asume el área del filtro igual a la del sedimentador y reactor debido al diseño de una unidad compacta, para así tener la misma longitud y ancho.

**Ecuación 13.** Área del filtro en función de la longitud y ancho

$$A_F = a_F * l_F$$

$$A_{RAFA} = A_s = A_F = 0,20 \text{ m} * 0,30 \text{ m} = 0,060 \text{ m}^2$$

#### b. Cálculo del volumen del Filtro

Para el diseño de la unidad compacta, la profundidad del filtro se dimensiona igual a la del sedimentador primario y reactor.

**Ecuación 14.** Volumen total del Filtro

$$V_{TF} = A_F * h_{TF}$$

$$V_{TF} = A_s * h_s = 0,06 \text{ m}^2 * 1 \text{ m} = 0,060 \text{ m}^3$$

#### c. Cálculo de la altura total del Filtro

**Ecuación 15.** Altura total del filtro

$$h_{TF} = h_{lf} + h_{bl} + h_{ff}$$

Se estable como altura del medio filtrante un valor de 630 mm (0,63) y se mantiene el fondo falso recomendado para el filtro anaerobio.

$$h_{ff} = 0,15 \quad h_{TF} = 0,15 * 1m = 0,15 m$$

Así con los valores ya establecidos, se calcula el borde libre en la parte superior del filtro.

$$h_{bl} = 1,0 m - 0,63 m - 0,15 m = 0,22 m$$

**d. Cálculo del volumen del Lecho Filtrante**

**Ecuación 16.** Volumen del lecho Filtrante

$$V_{LF} = A_F * h_{LF}$$

$$V_{LF} = 0,06 m^2 * 0,63 m = 0,0378 m^3$$

**e. Cálculo del tiempo de retención hidráulico**

**Ecuación 17.** Tiempo de residencia hidráulica del FAFA

$$THR_F = \frac{V_{LF}}{Q}$$

$$THR_{FAFD} = \frac{0,0378 m^3}{1,6 m^3/d} = 0,0236 d = 0,567 h$$

**f. Cantidad de carbón activado**

Para determinar la cantidad en masa del carbón activado, se emplea el dato de densidad del carbón de la **tabla 42**.

**Ecuación 18.** Cantidad de carbón activado

$$m_{CA} = \rho_F * V_{TF}$$

$$m_{CA} = 1400 \frac{kg}{m^3} * 0,0378 m^3 = 52,92 kg$$

## ANEXO 5.

### EVALUACIÓN TÉCNICA DE SITARD

Para calcular la eficiencia en las unidades de tratamiento, se toma la concentración generada por la unidad anterior como la concentración inicial, a excepción del sedimentador, que en su caso será la concentración del efluente generado por la unidad habitacional, adicionalmente, se toma el valor más grande de la concentración del parámetro. El valor de las eficiencias se toma de la **tabla 45**.

#### a. Sedimentador (S)

- SST

$$E_{SST(s)} = \frac{SST_0 - SST_f}{SST_0} = \frac{200 \frac{mg}{L} - SST_f}{200 \frac{mg}{L}} * 100\% = 50\%$$

Al despejar se obtiene:  
 $SST_f = 100 \frac{mg}{L}$

- DQO

$$E_{DQO(s)} = \frac{DQO_0 - DQO_f}{DQO_0} = \frac{233 \frac{mg}{L} - DQO_f}{233 \frac{mg}{L}} * 100\% = 30\%$$

Al despejar se obtiene:  $DQO_f = 163,1 \frac{mg}{L}$

- DBO

$$E_{DQO(s)} = \frac{DQO_0 - DQO_f}{DQO_0} = \frac{533 \frac{mg}{L} - DQO_f}{533 \frac{mg}{L}} * 100\% = 30\%$$

Al despejar se obtiene:  $DQO_f = 373,1 \frac{mg}{L}$

## b. Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA)

- SST

$$E_{SST(FAFA)} = \frac{SST_0 - SST_f}{SST_0} = \frac{100 \frac{mg}{L} - SST_f}{100 \frac{mg}{L}} * 100\% = 60\%$$

Al despejar se obtiene:  
 $SST_f = 40 \frac{mg}{L}$

- DQO

$$E_{DQO(FAFA)} = \frac{DBO_0 - DBO_f}{DBO_0} = \frac{163,1 \frac{mg}{L} - DBO_f}{163,1 \frac{mg}{L}} * 100\% = 60\%$$

Al despejar se obtiene:  $DBO_f = 57,1 \frac{mg}{L}$

- DBO

$$E_{DQO(FAFA)} = \frac{DQO_0 - DQO_f}{DQO_0} = \frac{373,1 \frac{mg}{L} - DQO_f}{373,1 \frac{mg}{L}} * 100\% = 50\%$$

Al despejar se obtiene:  $DQO_f = 149,2 \frac{mg}{L}$

## c. Filtro de Carbón Activado (F)

- SST

$$E_{SST(F)} = \frac{SST_0 - SST_f}{SST_0} = \frac{40 \frac{mg}{L} - SST_f}{40 \frac{mg}{L}} * 100\% = 64\%$$

Al despejar se obtiene:  
 $SST_f = 14,4 \frac{mg}{L}$

- **DQO**

$$E_{DBO(f)} = \frac{DBO_0 - DBO_f}{DBO_0} = \frac{57,1 \frac{mg}{L} - DBO_f}{57,1 \frac{mg}{L}} * 100\% = 53\%$$

Al despejar se obtiene:  $DBO_f = 26,8 \frac{mg}{L}$

- **DBO**

$$E_{DQO(s)} = \frac{DQO_0 - DQO_f}{DQO_0} = \frac{149,2 \frac{mg}{L} - DQO_f}{149,2 \frac{mg}{L}} * 100\% = 47\%$$

Al despejar se obtiene:  $DQO_f = 79,1 \frac{mg}{L}$

Al obtener las condiciones del afluente y efluente del SITARD, se determina la eficiencia global a partir de las concentraciones.

- **SST**

$$E_{SST(SITARD)} = \frac{SST_0 - SST_f}{SST_0} = \frac{200 \frac{mg}{L} - 14,4 \frac{mg}{L}}{200 \frac{mg}{L}} * 100\% = 93\%$$

- **DQO**

$$E_{DBO(SITARD)} = \frac{DBO_0 - DBO_f}{DBO_0} = \frac{233 \frac{mg}{L} - 26,8 \frac{mg}{L}}{233 \frac{mg}{L}} * 100\% = 88\%$$

- **DBO**

$$E_{DQO(SITARD)} = \frac{DQO_0 - DQO_f}{DQO_0} = \frac{533 \frac{mg}{L} - 79,1 \frac{mg}{L}}{533 \frac{mg}{L}} * 100\% = 95\%$$

## ANEXO 6.

### PRODUCCIÓN DE METANO EN EL BIOGÁS DEL FILTRO ANAEROBIO

**Ecuación 22.** *Porción de DQO convertida en metano*

$$DQO_{CH_4} = Q (DQO_o - DQO_f) - QDQO_o\gamma_{abs}$$

Para el caso del coeficiente de producción de sólidos en el sistema, se toma el valor inferior debido a que el valor de operación en el reactor no es el óptimo. Adicionalmente, se toma los valores calculados teóricamente de DQO del filtro anaerobio de la **tabla 48**.

$$DQO_{CH_4} = 1,6 \frac{m^3}{d} \left( 163,1 \frac{mgDQO}{L} - 57,1 \frac{mgDQO}{L} \right) * \frac{kgDQO}{1000000 mgDQO} * \frac{1000L}{1 m^3} \\ - 0,11 * 1,6 \frac{m^3}{d} * \left( 163,1 \frac{mgDQO}{L} * \frac{kgDQO}{1000000 mgDQO} * \frac{1000L}{1 m^3} \right)$$

$$DQO_{CH_4} = 0,149 \frac{kgDQO_{CH_4}}{d}$$

**Ecuación 24.** *Factor de corrección de Temperatura del filtro*

$$k(T) = \frac{P K_{DQO}}{R (273 + T)}$$

Para el caso del filtro anaerobio, debido a que no se implementó un calentador o un sistema para el control de la temperatura óptima, se opera a una temperatura

promedia ambiental de 25°C, y debido a que cuenta con una tubería para el escape del biogás, se trabaja el sistema a una atmosfera.

$$k(T) = \frac{1 \text{ atm} * 0,064 \frac{\text{kg DQO}}{\text{mol}}}{0,08206 \frac{\text{atm L}}{\text{mol K}} (273 + 25)} = 2,708 \times 10^{-3} \frac{\text{kg DQO}}{\text{L}} = 2,708 \frac{\text{kg DQO}}{\text{m}^3}$$

**Ecuación 23.** Producción volumétrica de metano

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{k(T)} = \frac{0,149 \frac{\text{kg DQO}_{CH_4}}{\text{d}}}{2,708 \frac{\text{kg DQO}}{\text{m}^3}} = 0,055 \frac{\text{m}^3 CH_4}{\text{d}}$$

## ANEXO 7.

### PARÁMETROS HIDRODINÁMICOS

Para completar los parámetros hidrodinámicos, se calcula la velocidad del fluido junto con el número de Reynolds para cada una de las unidades de tratamiento.

Asumiendo para la viscosidad cinemática una temperatura ambiente (25 °C)

- **Sedimentador (S)**

**Ecuación 27.** Velocidad del Fluido

$$v_{fs} = \frac{Q}{A_{ts}} = \frac{1,6 \frac{m^3}{d}}{\pi * \left( \frac{0,075 m}{2} \right)^2} * \frac{1 d}{24 h} * \frac{1 h}{3600 s} = 0,0042 \frac{m}{s}$$

**Ecuación 28.** Numero de Reynolds

$$R_{eS} = \frac{v_{fs} D}{\nu} = \frac{0,0042 \frac{m}{s} * 0,075 m}{1118967,452 \frac{m^2}{s}} = 2,815 \times 10^{-10}$$

- **Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA)**

**Ecuación 27.** Velocidad del Fluido

$$v_{fFAFA} = \frac{Q}{A_{tFAFA}} = \frac{1,6 \frac{m^3}{d}}{\pi * \left( \frac{0,075 m}{2} \right)^2} * \frac{1 d}{24 h} * \frac{1 h}{3600 s} = 0,0042 \frac{m}{s}$$

**Ecuación 28.** Numero de Reynolds

$$R_{eFAFA} = \frac{v_{fFAFA} D}{\nu} = \frac{0,0042 \frac{m}{s} * 0,075 m}{1118967,452 \frac{m^2}{s}} = 2,815 \times 10^{-10}$$

- **Filtro de Carbón Activado (F)**

**Ecuación 27.** Velocidad del Fluido

$$v_{fF} = \frac{Q}{A_{tF}} = \frac{1,6 \frac{m^3}{d}}{\pi * \left( \frac{0,075 m}{2} \right)^2} * \frac{1 d}{24 h} * \frac{1 h}{3600 s} = 0,0042 \frac{m}{s}$$

**Ecuación 28.** Numero de Reynolds

$$R_{eF} = \frac{v_{fF} D}{\nu} = \frac{0,0042 \frac{m}{s} * 0,075 m}{1118967,452 \frac{m^2}{s}} = 2,815 \times 10^{-10}$$

A partir del número de Reynolds, se establece que el flujo del agua residual es laminar.

## **ANEXO 8. RECOMENDACIONES**

Se plantean las siguientes recomendaciones para el presente proyecto de grado

Desarrollar la etapa de diseño que abarca la construcción y operación para el Sistema Individual de Tratamiento de Agua Residual Domestica (SITARD) propuesto en el presente trabajo de grado en un prototipo a nivel de laboratorio comparando las eficiencias globales esperadas y los valores con la Resolución 0631 de 2015.

Contemplar como opción el acero inoxidable, PVC o fibra de vidrio como materiales para la construcción debido a su resistencia a la corrosión y para el caso de la fibra de vidrio, debido a que es un aislante térmico, ideal para el filtro anaerobio y por su precio económico. Adicionalmente, contemplar la posibilidad de incorporar como medio filtrante PVC, bambú o esferas de polietileno y la instalación de tuberías para un retro lavado o evacuación en caso de emergencia.

Implementar para el sedimentador primario pantallas, o sedimentadores de alta tasa, que permita disminuir la velocidad con la que entra el agua residual al tanque para mejorar el proceso de sedimentación y tubos con orificios en ambos filtros para la distribución uniforme del agua los tanques, evitando zonas muertas en el momento de su implementación o construcción.

Realizar un estudio a nivel microbiológico del Filtro Anaerobio de Flujo Ascendente (FAFA) determinado el tipo de bacterias óptimas para del vertimiento generado por una unidad habitacional en el área rural.

Contemplar los elementos de incertidumbre y su impacto para la aplicación del diseño del SITARD, puesto que es necesario considerar la variabilidad en torno a la composición del agua residual doméstica, ya que varía dependiendo de su lugar de ubicación y la misma vivienda y la temperatura puesto que afecta la remoción y producción de biogás en el filtro anaerobio, y por último, su complejidad en la operación, ya que el propósito es que opere bajo tierra.